

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*



ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваўне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічных тэхналогій і аховы працы.

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химических технологий и охраны труда.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in mechanical engineering and machine science, material authority and metallurgy, applied chemistry and labor protection.

Адрес редакции:
Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 53 34 58, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск В.П. Иванов, Н.Н. Попок, А.А. Ермак.
Редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 26.02.2016. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 22,67. Уч.-изд. л. 27,18. Тираж 100 экз. Заказ 908.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 631.3.004.67

ПЕРИОДИЧНОСТЬ И ОБЪЕМ РЕМОНТА АВТОМОБИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ
(Полоцкий государственный университет)

Главная задача авторемонтного производства заключается в восстановлении надежности автомобилей при полном использовании остаточной долговечности деталей (К.Т. Кошкин).

Рассматривается проблема организации ремонта автомобильных агрегатов, его периодичность и объем. Предложен ремонтный цикл автомобильных агрегатов с ограничением числа трудоемких ремонтов с нанесением покрытий, обеспечивающий пропорциональность наработки восстановленных деталей межремонтному пробегу агрегата. Определен критерий технического уровня современного авторемонтного производства. Обосновано направление повышения долговечности трущихся поверхностей деталей при восстановлении.

Ключевые слова: автомобильный агрегат, надежность, ремонтный цикл, организация ремонта.

Состояние проблемы. Долговечность автомобилей в последнее время существенно повысилась за счет применения новых материалов и более совершенного оборудования. При этом за место на рынке продукции и услуг вступили в конфликт финансовые интересы структур двух групп. Первая группа включает производство автомобилей и запасных частей, посредничество и обслуживающий бизнес. Вторая группа – сохранившаяся часть производства по специализированному ремонту и владельцы техники. В результате этого произошел развал ремонтного производства с исключением капитального ремонта полнокомплектных автомобилей из их жизненного цикла и сокращением объемов ремонта агрегатов на специализированных предприятиях.

Рекламная политика производителей автомобилей, требующая загрузки своего производства с получением максимального дохода и наибольшей прибыли, нацелена на то, чтобы по истечении установленного срока службы произведенный автомобиль был утилизирован или продан в «третьи» страны, а вместо него приобретен новый экземпляр. Только состоятельным владельцам позволительно сбывать автомобиль с незначительно израсходованным ресурсом и приобрести новую машину.

Потребность в ремонте автомобилей не уменьшилась, он лишь переместился со специализированных предприятий в мастерские и гаражи. Его объемы и затраты возросли. Например, только в Министерстве сельского хозяйства России годовые затраты на ремонт техники превысили 60 млрд руб. Ремонт автомобилей в условиях эксплуатационных предприятий и мастерских связан с заменой отказавших частей новыми изделиями, а ремонт агрегатов – с заменой изношенных деталей новыми запасными частями без восстановления геометрических параметров корпусных деталей, в которые устанавливаются эти детали. В качестве запасных частей производителям техники выгодно поставлять дорогостоящие детали, изготовленные, как правило, с отступлением от требований технической документации, которые нежелательно использовать при сборке нового изделия. Такой ремонт выгоден лишь вновь образованным структурам бизнеса. Однако владельцы техники экономически заинтересованы в ремонте агрегатов с восстановлением деталей при полном использовании их остаточной долговечности.

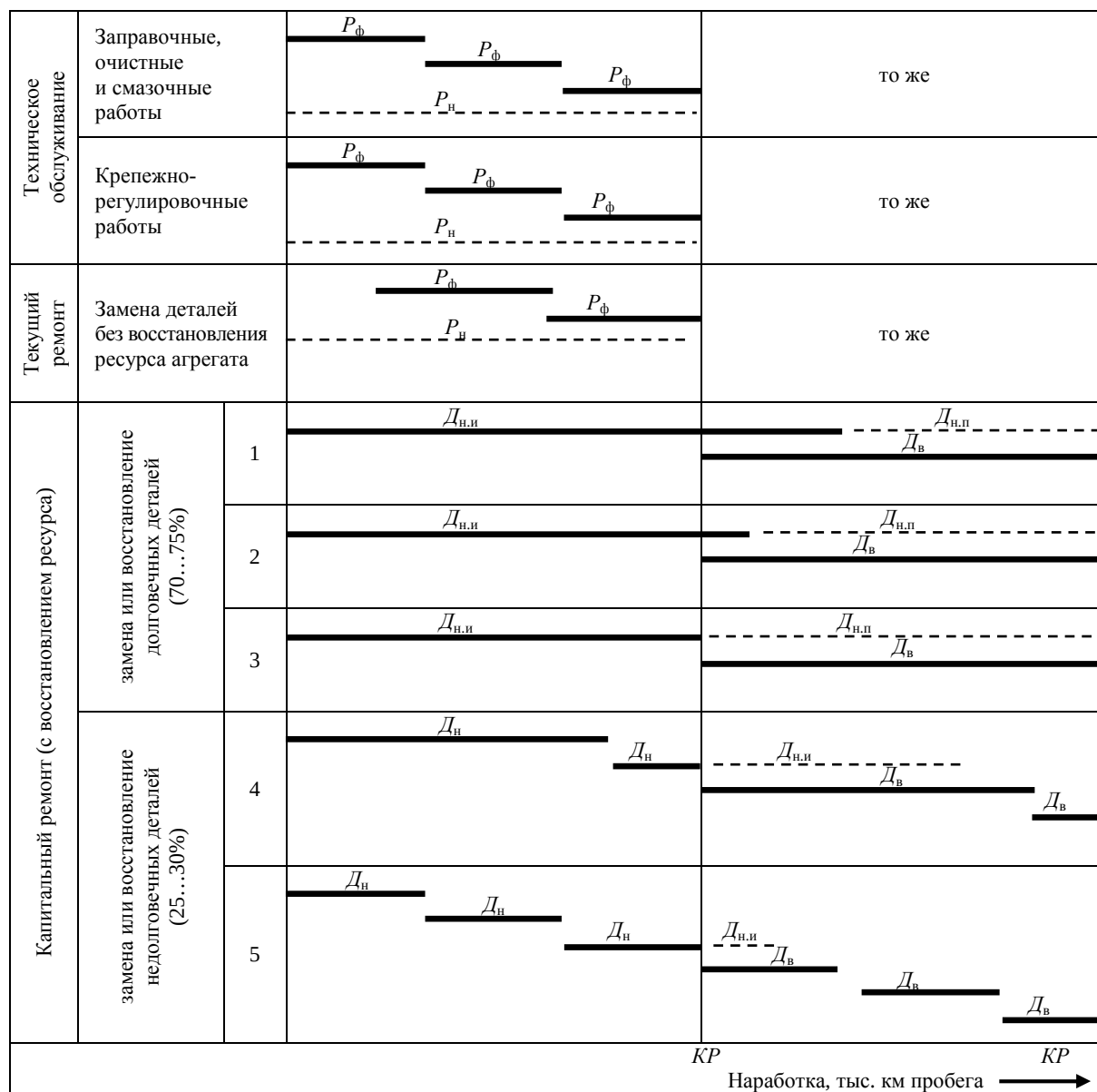
Нет ничего дешевле полного использования остаточной долговечности деталей и нет ничего дороже пренебрежения этой возможностью.

Таким образом, оптимальное решение, определяющее место, время, содержание и объем ремонтных работ в течение всего срока службы агрегатов, как стратегия ремонта частей автомобилей требует в настоящее время уточнения.

Цель работы – на примере самых сложных автомобильных агрегатов (двигателей) обосновать их ремонтный цикл, составляющий основу стратегии ремонта, и определить требования к техническому уровню авторемонтного производства.

Основная часть. *Нормативная надежность автомобиля* в течение его жизненного цикла обеспечивается ремонтными операциями, представленными на рисунке 1 [1]. Создатели автомобиля (конструкторы, технологи, производственники) закладывают в него эксплуатационные свойства, которые обеспечивают работоспособность в течение всего срока службы при условии использования по назначению с

выполнением необходимого объема работ по техническому обслуживанию и ремонту. Несмотря на стремление создать агрегаты из деталей, достигающих предельного состояния одновременно, это по ряду причин не удастся, в том числе вследствие использования техники в различных эксплуатационных условиях.



P_{ϕ} – фактическая работоспособность агрегата; P_n – нивелированная работоспособность агрегата ремонтными воздействиями во время его использования; $D_{н.и}$ и $D_{н.п}$ – долговечность новой детали, обусловленная износостойкостью и прочностью соответственно; $D_{в}$ – долговечность восстановленной детали;
 KP – капитальный ремонт; 1–5 – группы деталей по долговечности

Рисунок 1 – Обоснование необходимости технического обслуживания, текущего и капитального ремонтов в системе содержания автомобилей в работоспособном состоянии [1]

Техническое обслуживание и ремонтные мероприятия. Техническое обслуживание продлевает время пребывания автомобиля в работоспособном состоянии за счет выполнения заправочных, очистных, смазочных и крепежно-регулирующих работ. Ремонтные работы предусматривают замену (восстановление) составных частей изделий с сопутствующими работами (очисткой, разборкой, определением технического состояния деталей и их восстановлением, сборкой, окрашиванием, обкаткой и испытаниями).

Если предельного состояния достигают одна или реже несколько неосновных деталей, необходим текущий ремонт, который не восстанавливает ресурс агрегата. Потребность в среднем ремонте, выполняемом в эксплуатационном предприятии и восстанавливающем ресурс агрегата частично, возникает тогда, когда ограниченная нормативными документами номенклатура деталей требует замены новыми

или восстановленными изделиями. Если предельного состояния достигли и основные (в том числе корпусные) детали, необходим капитальный ремонт агрегата, восстанавливающий его ресурс полностью в условиях специализированного ремонтного предприятия.

Потребность, вид, объем и периодичность ремонта определяются количеством и видом деталей, достигших после определенной наработки предельного состояния или близкого к нему.

Технико-экономический критерий выбора способа восстановления детали традиционно учитывает соотношение стоимости восстановленной детали, цены одноименной новой детали и их долговечности [2]:

$$C_v \leq k_d C_n, \quad (1)$$

где C_v – стоимость восстановленной детали; C_n – цена новой детали; $k_d = D_v/D_n$ – коэффициент долговечности; D_v и D_n – долговечность восстановленной и новой детали соответственно.

Однако выражение (1) должно быть дополнено ограничением кратности наработки восстановленных деталей межремонтному пробегу агрегата за счет использования технических решений, уравнивающих наработку деталей повышением их износостойкости.

Средние ресурсы деталей двигателей в долях ресурса их базовых деталей (блоков цилиндров), определенные опытным путем, приведены в таблице 1. Большая долговечность базовых (корпусных) деталей, превышающая даже амортизационную наработку агрегата, обусловлена отсутствием в них трущихся элементов, большой статической прочностью и жесткостью. Долговечность трущихся деталей значительно ниже долговечности корпусных деталей, что обуславливает их замену при использовании агрегата. Ряд недолговечных деталей (вкладыши коленчатого вала, поршневые кольца, поршни, уплотнения и др.) требуют более частой замены. Эти сведения позволяют обосновать номенклатуру деталей, заменяемых при различной наработке двигателей, и определить вид ремонта. При текущем ремонте заменяют наиболее изнашиваемые детали. Средний ремонт предполагает замену деталей, ресурс которых составляет примерно половину от ресурса базовой детали.

Таблица 1 – Относительные средние ресурсы деталей двигателей

Названия деталей	Средние ресурсы в долях от ресурса базовой детали
Блок цилиндров	1,00
Шатун	1,00
Распределительный вал	0,84...1,00
Головка цилиндров	0,87...0,92
Поршневой палец	0,90...1,00
Гильза цилиндра	0,66...0,91
Коленчатый вал	0,62...0,69
Клапаны	0,61...0,92
Поршень	0,57...0,65
Вкладыши шатунные	0,44...0,52
Кольца маслосъемные	0,43...0,48
Кольца компрессионные	0,41...0,45
Вкладыши коренные	0,38...0,48

Мероприятия по повышению послеремонтной наработки трущихся деталей. Современное состояние науки и практики позволяет обеспечить приведенное выше ограничение. Действительно, нанесение покрытий при восстановлении трущихся поверхностей деталей с насыщением их материала необходимыми легирующими элементами подобно химико-термической обработке поверхностных слоев связано с образованием материала нового химического, структурного и фазового состава, отличного от материала основы. Насыщение поверхностных слоев, например, углеродом, азотом, бором или их сочетанием с последующими закалкой и отпуском приводят к образованию упрочняющей фазы [3]. Необходимо предварительно согласовать состав исходного материала покрытий с требуемым фазовым составом образуемого покрытия. Физико-техническая обработка в виде лазерной и электронно-лучевой обработки способствует формированию такого материала. Образуется гетерогенная структура материала (типа Г. Шарпи), состоящая из твердых зерен карбидов, нитридов или других соединений, равномерно распределенных в упругопластической стальной матрице, при этом поверхностные слои трущихся материалов должны обладать меньшей прочностью, чем нижележащие слои (правило положительного градиента), и не наклепываться при трении.

Ремонтный цикл. Исходя из рассмотрения соотношения стоимости ремонта и послеремонтной наработки агрегатов с использованием новых и восстановленных деталей предлагается ремонтный цикл в трех видах (рис. 2), составленный из фрагментов эксплуатационного цикла (без использования по назначению и без технического обслуживания). Этот цикл в зависимости от наработки включает ремонты различных категорий и отличается от базового наличием среднего ремонта с использованием заранее подготовленного ремонтного комплекта деталей. Если ремонтный цикл агрегатов охватывает несколько лет, в течение которых автомобили данной марки морально устаревают, из цикла исключают капитальный ремонт. Периодичность капитального и среднего ремонтов планируют, периодичность текущего ремонта планировать невозможно. Предложенный ремонтный цикл предполагает ограничение числа восстановлений деталей и, соответственно, трудоемких ремонтов. Восстановительное покрытие на отдельную поверхность наносят один раз.

1-й вид				
ВЭ	T – T – C – T – T	K	T – T – C – T – T	У _T
		2-й вид		
ВЭ	T – T – C – T – T	У _T		
3-й вид				

ВЭ – ввод в эксплуатацию;
T – текущий ремонт по результатам диагностирования
при техническом обслуживании; C – средний ремонт;
K – капитальный ремонт; Ут – утилизация

Рисунок 2 – Ремонтные циклы агрегатов машин

Для среднего ремонта агрегатов, который следует вернуть в систему технического обслуживания и ремонта, предполагают использование специально подготовленного в условиях авторемонтного завода *ремонтного комплекта деталей* (табл. 2) с восстановлением параметров формы и расположения отверстий под подшипники, гильзы и стаканы в корпусных деталях (у блока цилиндров – коренных опор хонингованием без нанесения покрытий). Часть деталей комплекта составляют приобретенные запасные части, вторую его часть изготавливают на ремонтном предприятии, а оставшуюся часть – восстанавливают.

Таблица 2 – Состав ремонтного комплекта деталей бензинового двухрядного восьмицилиндрового двигателя

Деталь (количество в комплекте)	Источник комплектования
Гильза цилиндра (8)	Растачивание и хонингование под ремонтный размер. Изготовление из отливки обработкой резанием
Прокладка гильзы цилиндра (24)	Изготовление штамповкой
Прокладка крышки распределительных шестерен (1)	
Стопорное кольцо (16)	Приобретение
Прокладка головки цилиндров (1)	
Комплект поршневых колец (1)	
Комплект вкладышей шатуна (1)	
Комплект вкладышей коренных подшипников (1)	
Набивка сальника (2)	Шлифование юбки, восстановление канавок под кольца, развертывание отверстия под поршневой палец. Изготовление из отливки обработкой резанием с нанесением прирабочного покрытия
Поршень (8)	
Поршневой палец (8)	Хромирование или термопластическая раздача, шлифование
Шатун в сборе (8)	Железнение поверхности в нижней головке, хонингование, замена втулки верхней головки, растачивание
Коленчатый вал (1)	Шлифование и полирование шеек под ремонтные размеры. Напыление или наплавка шеек, их шлифование под номинальный размер и полирование
Выпускной клапан (8)	Железнение стержня, наплавка фаски, шлифование
Уплотнительная прокладка заднего сальника (2)	Изготовление вулканизацией в пресс-форме
Маслоотражательный колпачок впускного клапана (8)	
Уплотнительная прокладка клапанной крышки (1)	
Задняя прокладка впускной трубы (1)	
Боковая прокладка впускной трубы (2)	
Передняя прокладка впускной трубы (1)	

Практическое использование предложенного ремонтного цикла агрегатов позволяет более полно использовать остаточную долговечность деталей с достижением нормативной послеремонтной наработки при уменьшении стоимости ремонта.

Технический уровень авторемонтного предприятия характеризуют наработкой отремонтированных агрегатов. Изучение влияния основных структурных параметров агрегатов на их послеремонтную наработку позволяет выработать требования к техническому уровню авторемонтных предприятий и объективно определить остаточный ресурс этих агрегатов на различных стадиях использования. С этой целью в условиях ОАО «Полоцкий завод «Проммашремонт»» проведен трудоемкий промышленный эксперимент [4], в результате которого выявлено влияние точности основных геометрических параметров деталей и соединений на послеремонтную наработку двигателей. В процессе эксперимента выделены параметры, в наибольшей мере влияющие на послеремонтную наработку L двигателей: несоосность средней коренной опоры блока цилиндров относительно крайних (x_1 , мм), несоосность средней коренной шейки коленчатого вала относительно крайних (x_2 , мм), зазор в коренных (x_3 , мм) и шатунных (x_4 , мм) подшипниках коленчатого вала, зазор между гильзой и поршнем (x_5 , мм), нецилиндричность трущейся поверхности гильзы цилиндра (x_6 , мм), непараллельность осей отверстий шатуна (x_7 , мм/100 мм), неперпендикулярность осей юбки поршня и отверстия под поршневой палец (x_8 , мм/100 мм).

Работы выполнялись без вмешательства в технологические процессы и организацию восстановления деталей и сборки двигателей. Параметры x_1 , x_2 , x_6 и x_7 измерялись на деталях. Остальные параметры в виде замыкающих размеров соединений рассчитывались после измерения соответствующих размеров деталей, входящих в соединения, при комплектовании двигателя деталями. Области определения параметров ограничены слева минимальными значениями, установленными нормативной документацией на восстановление деталей, а справа – максимальными значениями, выявленными при их измерениях.

Большой интерес для исследования представляли случаи, когда значения параметров-аргументов существенно превышали нормативные, например, при выпуске продукции по особым санкциям. Существенные отклонения параметров деталей от нормативных вызваны использованием запасных частей низкого качества, недостаточными возможностями металлорежущего оборудования и применением деталей ремонтного фонда, параметры которых согласно руководству по капитальному ремонту агрегатов уступают параметрам новых деталей.

Между указанными величинами установлена степенная зависимость:

$$L = 0,0052x_1^{-0,541}x_2^{-0,417}x_3^{-0,732}x_4^{-0,919}x_5^{-0,608}x_6^{-0,340}x_7^{-0,299}x_8^{-0,316}, \text{ тыс. км}, \quad (2)$$

адекватность которой экспериментальным данным подтверждена с помощью дисперсионного отношения Фишера.

Определим степень влияния k_i каждого отдельного структурного параметра ($x_1, \dots, x_8$) на послеремонтную наработку агрегата как отношение максимального $L_{\max}$ к минимальному $L_{\min}$ значению наработки при изменении параметра в рассматриваемых пределах

$$k_i = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}, \quad (3)$$

где $i = 1, \dots, 8$ – номер структурного параметра.

При изменении параметров в пределах их шага варьирования (0,01 или 0,01 мм на 100 мм длины) степени влияния параметров образуют ряд: $k_4 \rightarrow k_3 \rightarrow k_5 \rightarrow k_1 \rightarrow k_2 \rightarrow k_6 \rightarrow k_8 \rightarrow k_7$, а при изменении их в пределах области определения ряд имеет следующий вид: $k_5 \rightarrow k_4 \rightarrow k_1 \rightarrow k_3 \rightarrow k_7 \rightarrow k_8 \rightarrow k_2 \rightarrow k_6$.

Послеремонтная наработка агрегатов изменяется до четырех раз при варьировании параметров в пределах их области определения. Если значения указанных параметров выдерживаются в нормативных пределах, разброс наработки сокращается в два-три раза, т.е. прогнозирование послеремонтной наработки становится более достоверным.

Наибольшее влияние на долговечность отремонтированных двигателей оказывают начальные зазоры в трущихся соединениях и наименьшее – параметры формы и расположения поверхностей. Наблюдается непрерывное уменьшение ресурса агрегатов при отклонении в худшую сторону параметров от их нормативных значений. Приводимые в ряде исследований утверждения о том, что существуют оптимальные значения структурных параметров, превышающие значения параметров, установленных заводами-изготовителями, оказались неправомерными.

Таким образом, геометрические параметры восстановленных деталей не должны уступать соответствующим параметрам новых деталей, установленным заводами-изготовителями. Технический уровень восстановительно-обрабатывающих участков авторемонтного производства, которые прошли реконструкцию или техническое перевооружение, должен обеспечить неукоснительное выполнение норма-

тивных значений геометрических параметров восстанавливаемых деталей в пределах требований завода-изготовителя. Ремонтное предприятие должно быть способно вместе с восстановлением деталей также изготавливать детали для поставки их в виде товарной продукции на автомобильные заводы или на рынок в виде запасных частей. Практика подтверждает, что ремонтные предприятия изготавливали для этих целей гильзы цилиндров, седла клапанов, поршни, коленчатые и распределительные валы, маховики, венцы маховиков и другие детали. Упрочнение трущихся поверхностей с нанесением приработочных покрытий обеспечивает наработку до предельного состояния, превышающую соответствующую наработку деталей, изготовленных на автомобильных заводах.

Выводы. Технический уровень авторемонтных предприятий может быть доведен до уровня машиностроения благодаря использованию современных средств и процессов ремонта из расчета обеспечения геометрических параметров восстановленных деталей, не уступающих соответствующим параметрам новых деталей. Долговечность трущихся поверхностей восстановленных деталей может быть существенно повышена износостойкими покрытиями или слоями соответствующего химического и фазового состава с термической обработкой, что обеспечивает кратность наработки восстановленных деталей межремонтному пробегу агрегата при полном использовании остаточной долговечности деталей.

Предложенная структура ремонтного цикла агрегатов с ограничением числа трудоемких ремонтов и нанесения покрытий требует возвращения среднего ремонта в систему технического обслуживания и ремонта с использованием комплекта деталей, подготовленного ремонтным предприятием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология авторемонтного производства / А.И. Асриянц [и др.]; под ред. К.Т. Кошкина. – М.: Транспорт, 1969. – 568 с.
2. Шадричев, В.А. Основы технологии автостроения и ремонт автомобилей / В.А. Шадричев. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. – 560 с.
3. Школкин, Е.А. Повышение межремонтного ресурса чугунных коленчатых валов конструктивно-технологическими способами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / Е.А. Школкин; Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева. – Саранск, 2011. – 18 с.
4. Иванов, В.П. Влияние качества ремонта двигателей на их долговечность / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк // Вестн. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 30–34.

Поступила 19.01.2016

IMPROVING REPAIR STRATEGIES AUTOMOBILE UNITS

V. IVANOV

The problem of automobile units repair, its frequency and volume is considered. Proposed maintenance cycle of automobile units with limited number of time-consuming repairs coated, ensuring the proportionality of use of recovered parts turnaround unit. It defines the criteria of the modern technical level automotive production. The directions of increase of durability of rubbing surfaces of renovation details.

Keywords: automobile units, reliability, repair cycle, repair engineering.

УДК 621.01

ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОТКРЫТОГО МНОЖЕСТВА СПОСОБОВ ОБКАТНОГО ЗУБОДОЛБЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

канд. техн. наук, проф. А.И. ГОЛЕМБИЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

С системных позиций описываются пионерный способ обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес с радиальным врезанием, а также производные от него первообразные способы с касательным и спиральным врезанием. Анализируются специфические особенности обкатного зубодолбления – явление затирания, особенности стружкообразования. Рассматриваются пути минимизации влияния этих явлений на размерную стойкость зуборезных долбяков. Показано с точки зрения синергетики, что на поле ветвящихся путей эволюции открытого множества способов обработки цилиндрических зубчатых колес обкатное зубодолбление образует аттрактор (коридор) целенаправленного развития подмножеств способов обкатного зубодолбления, различающихся видом движения врезания.

Ключевые слова: обкатное зубодолбление, эволюция, цилиндрические колеса, размерная стойкость, максимизация.

Введение. Развитие теории зубчатых зацеплений стало объективной предпосылкой изобретения пионерных способов нарезания зубчатых колес при их профилировании обкатом, обеспечивших революционные преобразования в области их формообразующей обработки. В частности, впервые в мировой практике фирма «Феллоу» (США) в 1905 году выпустила первый зубодолбежный станок для нарезания цилиндрических прямозубых колес зуборезным долбяком [1]. Таким образом, на основе научного подхода были изобретены способ обкатного зубодолбления, зуборезный долбяк и соответствующий зубодолбежный станок. В основу воспроизведения профиля зубьев цилиндрического колеса по пионерному способу обкатного зубодолбления положено зацепление пары зубчатых колес. Ниже рассматривается целенаправленная эволюция обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес.

Пионерный способ обкатного зубодолбления с радиальным врезанием. По пионерному способу обкатного зубодолбления (рис. 1) заготовка 1 относительно долбяка 2 устанавливается в плоскости $A-A$, совпадающей с плоскостью осей заготовки и долбяка. Процесс получения зубчатого колеса осуществляется в результате сообщения долбяку и заготовке нескольких формообразующих и вспомогательных движений. Линия зуба (образующая) зубчатого колеса – прямая, параллельная оси заготовки, – воспроизводится элементарным движением $\Phi_o(\uparrow\Pi_1)$ долбяка, а профиль зубьев (направляющая) – двух-элементарным движением обката $\Phi_n(B_2B_3)$, состоящим из двух функционально связанных элементарных движений: вращения B_2 долбяка и вращения B_3 заготовки. На начальном этапе одновременно с указанными движениями заготовке (или долбяку) сообщается движение $Vp(\Pi_4)$ радиального врезания на высоту зуба нарезаемого колеса. В течение всего цикла обработки долбяку сообщается движение $Vc(\Pi_5)$ «отскока», предназначенное для отвода долбяка от заготовки при его возвратном ходе в движении $\Phi_o(\uparrow\Pi_1)$ с целью устранения явления затирания, проявляющегося в виде скольжения зубьев долбяка о зубья профилируемого колеса.

В приведенном примере способ формообразующей обработки характеризуется некоторой совокупностью приемов, т.е. целенаправленных действий (движений), совершаемых заготовкой и долбяком

Рисунок 1 – Способ долбления прямозубых цилиндрических колес с радиальным врезанием

для достижения первообразной цели – получения прямозубого колеса внешнего зацепления. Наряду с приемами целенаправленных действий в качестве признаков способа выступают последовательность приемов и правила выполнения отдельных приемов – определенность установки заготовки относительно направления движения врезания и существенно меньшей скорости движения врезания и скорости обката (круговой подачи) по сравнению со скоростью резания. Таким образом, с позиций общей теории

систем пионерный способ обкатного зубодолбления – это законченный целостный объект реальной действительности. Его синергизм – существенное повышение производительности и кинематической точности прямозубых цилиндрических зубчатых колес [2].

Позже в фирме «Сайкс» (Великобритания), используя принцип независимости формообразующих движений, с целью долбления косозубых цилиндрических колес в схеме рассмотренного пионерного способа элементарное поступательно-возвратное движение $\Phi_o(\uparrow P_1)$ преобразовали в двухэлементарное возвратно-винтовое движение $\Phi_o(\uparrow P_1 \uparrow B_6)$, где $\uparrow B_6$ – дополнительное вращательно-возвратное движение долбяка. Полученный таким образом способ долбления косозубых цилиндрических колес с радиальным врезанием отличается от пионерного дополнительным элементом (движением $\uparrow B_6$) и правилом его выполнения (функциональной связью с движением $\uparrow P_1$).

Способы долбления с радиальным врезанием используют также при обработке зубчатых колес внутреннего зацепления. В этом случае элементарные движения, образующие сложное движение обката, вращаются в одну и ту же сторону.

Способ обкатного зубодолбления с касательным врезанием. Этот способ, производный от пионерного способа обкатного зубодолбления, предложен в 70-е годы прошлого столетия [3]. При зубодолблении с касательным врезанием (рис. 2) заготовку 1 устанавливают на расстоянии h от плоскости движения врезания, равном половине диаметра делительной окружности долбяка 2. Затем долбяку и заготовке сообщают формообразующие и вспомогательные движения. Линия зуба (образующая) зубчатого колеса воспроизводится движением $\Phi_o(\uparrow P_1)$ долбяка, а профиль зубьев (направляющая) – двухэлементарным движением обката $\Phi_n(B_2B_3)$. На начальном этапе заготовке 1 сообщают также двухэлементарное движение врезания $Bp(P_4B_6)$, воспроизводящее зубчато-реечное зацепление. Это движение продолжают до тех пор, пока ось долбяка не переместится на линию $A-A$, соответствующую окончанию врезания. В этом положении движение врезания прекращают, и на втором этапе в течение одного оборота заготовки профилируют нарезаемое колесо движением обката. В течение всего цикла обработки заготовке сообщают движение $Bc(P_5)$ «отскока» синхронно с движением $\Phi_o(\uparrow P_1)$ долбяка.

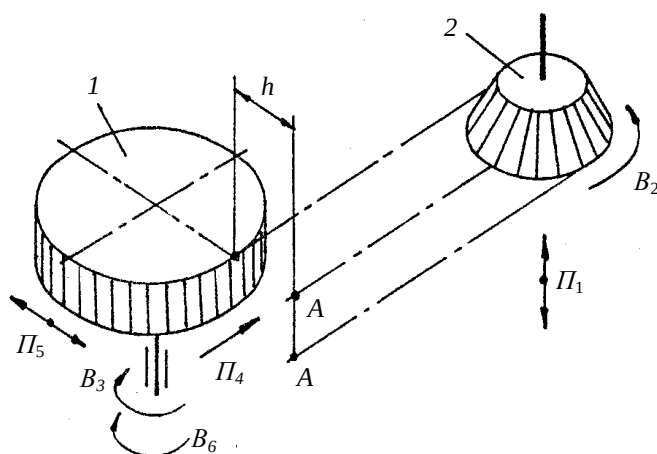


Рисунок 2 – Способ долбления прямозубых цилиндрических колес с касательным врезанием

Данный способ, признанный изобретением, сложнее пионерного, так как содержит дополнительный прием (дополнительное вращение B_6 заготовки). Изменены также правила выполнения приемов – установка заготовки на вполне определенное расстояние от плоскости движения врезания и согласование элементарных движений, образующих сложное движение врезания. По утверждению автора этого способа, такое усложнение обеспечивает одинаковые условия резания на режущих кромках зубьев долбяка, что позволяет повысить его размерную стойкость. Однако это утверждение недостаточно корректно. Действительно, на этапе касательного врезания условия резания несколько изменяются, так как врезание воспроизводит зубчато-реечное зацепление. На этапе профилирования условия резания для обоих видов врезания (касательного и радиального) одинаковы. Поэтому некоторые отличия условий резания на этапе врезания не могут дать существенного повышения периода размерной стойкости инструмента.

Для способа обкатного зубодолбления с радиальным врезанием путь врезания зависит только от модуля и практически равен высоте зуба нарезаемого колеса. При зубодолблении с касательным врезанием этот путь существенно возрастает как при увеличении числа зубьев нарезаемого колеса, так и при увеличении числа зубьев долбяка. Следовательно, при касательном врезании возрастает машинное время на этапе врезания, что в итоге снижает производительность зубонарезания. Вполне естественна следующая производная цель – уменьшение машинного времени врезания. Для достижения данной цели можно следующим образом изменить правила выполнения врезания. По сложившейся традиции врезание осуществляют одновременно с обкатом. Причем подачу врезания устанавливают 0,1...0,3 значения круговой подачи. Следовательно, процесс зубодолбления на этапе врезания осуществляется при суммарной подаче, векторное значение которой при касательном врезании составляет 1,1...1,3 значения круговой подачи. Считая, что суммарная подача на этапе врезания лимитирует технологическую надежность станка, можно уменьшить машинное время выполнения этого этапа посредством последовательного выполнения врезания и обката, установив значение подачи врезания, равное суммарной подаче, например, среднее ее

значение, составляющее 1,2 значения круговой подачи. При последовательном выполнении касательного врезания и профилирования в структуре соответствующего станка в момент прекращения движения врезания и включения движения профилирования в цепи обката происходит натяжение кинематических передач под воздействием силы резания. В итоге происходит круговое смещение долбяка относительно нарезаемого колеса на величину, пропорциональную суммарной круговой податливости передач, следствием чего является заужение (утонение по толщине) последнего нарезаемого зуба. Устранить это нежелательное при чистовой обработке явление можно следующим образом. Необходимо движение касательного врезания на протяжении $2/3 \dots 3/4$ пути осуществлять с подачей, составляющей 1,2 значения круговой подачи. Затем на оставшемся участке пути врезания подачу врезания необходимо регрессивно уменьшать, а круговую подачу прогрессивно увеличивать так, что суммарная подача сохраняется постоянной. В итоге к моменту окончания касательного врезания круговая подача возрастает до заданного значения, а подача касательного врезания уменьшается до нулевого значения. Данное правило выполнения движений врезания и обката наиболее рационально использовать на зубодолбежных станках с ЧПУ.

Правило выполнения приема установки заготовки при касательном врезании создает условия для обработки одним долбяком двух заготовок на двух позициях как последовательно, так и параллельно. В этом случае некоторое усложнение структуры первообразного способа оправдывается повышением производительности. Соответствующие способы зубодолбления, в том числе признанные изобретениями, рассмотрены в монографии [4].

Специфической особенностью обкатного зубодолбления является прерывистый (дискретный) характер резания, так как срезание стружки происходит только при рабочем ходе долбяка в движении $\uparrow P_1$ скорости резания. Движение обката, скорость которого определяется круговой подачей долбяка, в течение всего цикла обработки происходит непрерывно. Следовательно, оба формообразующих движения функционируют в качественно различном ритме, что неизбежно при каком-то значении круговой подачи и при принятой величине «отскока» долбяка на холостом ходу приводит к возникновению явления затирания.

Природа явления затирания объясняется следующим образом [5]. При обкате долбяка и заготовки очередной зуб долбяка, вступая в зону зацепления, профилирует впадину копированием и обкатом. На первом рабочем ходе долбяка в движении $\uparrow P_1$ на заготовке копируется часть профиля зуба, а при последующих рабочих ходах копирование сопровождается обкатом. Причем по мере прохождения каждым зубом долбяка зоны резания протяженность копирующей части профиля зуба сначала возрастает от нуля до некоторого максимума, а затем убывает, приближаясь к нулю. Перенос зоны копирования по линии зуба осуществляется по винтовой линии, угол подъема которой равен углу между вектором скорости резания и вектором движения формообразования, определяемом как геометрическая сумма векторов скорости резания и круговой подачи. При холостом ходе в движении $\uparrow P_1$ (деление по линии зуба нарезаемого колеса) долбяк контактирует боковыми задними поверхностями каждого зуба с материалом заготовки на локализованном участке, срезаемом при следующем рабочем ходе, т.е. возникает явление затирания. Это явление циклически повторяется на каждом зубе долбяка, вступающем в процесс долбления. Наиболее неблагоприятные условия резания каждым зубом соответствуют начальному этапу, где преобладает копированием и, следовательно, возможны наибольшие по величине натяги при затирании. На режущих кромках данному этапу соответствуют зоны более интенсивного износа по задним поверхностям входных боковых режущих кромок у вершин зубьев долбяка, чем у их ножек.

На первом этапе поиска технических решений, обеспечивающих устранение явления затирания, доминировала виртуальная идея «косого отскока». Наибольший интерес представляет способ зубодолбления, производный от пионерного, по которому долбяку сообщают дополнительный «круговой отскок» в сторону, противоположную вектору круговой подачи. В этом случае за счет сложения векторов радиального и кругового «отскоков» при холостом ходе воспроизводится «косой отскок». Такое решение, признанное изобретением [6], усложняет кинематическую подсистему пионерного способа. Этот способ используется в зубодолбежных станках фирмы «Тос Челаковице» (Чехия).

В работе [7] показано, что «косой отскок» не решает в целом задачу устранения явления затирания. Причем при однократном, наиболее распространенном, зубодолблении «косой отскок» переносит зону возникновения явления затирания на противоположную боковую режущую кромку зубьев долбяка. Поэтому представляются более рациональными решения, основанные на принципе приведения ритма движения обката $\Phi_n(B_2B_3)$ к ритму движения скорости резания $\Phi_o(\uparrow P_1)$. Следовательно, можно на периоды холостого хода долбяка прекращать движение обката. Такой вариант, признанный изобретением [8], изменяет только функцию пионерного способа зубодолбления.

Особенности срезания припуска при обкатном зубодолблении. Основная масса припуска при зубодолблении срезается вершинными и входными режущими кромками зубьев долбяка [9]. Причем толщина стружек, срезаемых режущими кромками на окружностях выступов, приблизительно одинакова, а толщина стружек, срезаемых выходными режущими кромками, значительно меньше толщин стружек, срезаемых входными режущими кромками на одноименных окружностях. Таким образом, для зубо-

долбления характерны неодинаковость толщин стружек на различных режущих кромках зубьев долбяка и возрастание толщин стружек от основания к вершине зубьев долбяка. При малых круговых подачах, принятых при зубодолблении, выходная режущая кромка срезает тонкие стружки, соизмеримые с естественным радиусом закругления режущей кромки. С увеличением круговой подачи толщина стружек на различных участках режущих кромок зубьев долбяка возрастает пропорционально круговой подаче.

При прохождении каждым зубом долбяка зоны обработки прослеживаются три качественно различных периода срезания стружки [9; 10]:

- период, начинающийся с момента начала резания вершинной и входной режущими кромками до вступления в зону обработки выходной режущей кромки. Срезаемые стружки имеют *L*-образную форму;
- период резания вершинной, входной и выходной режущими кромками. Срезаемые стружки имеют *U*-образную форму;
- период выхода зуба долбяка из зоны резания. Срезаемые стружки имеют *L*-образную форму, постепенно переходящую в *I*-образную.

При зубодолблении по традиционной, пионерной схеме наиболее распространен тип *U*-образного схода стружки (рис. 3, *а*), при котором входная 1 и вершинная 2 режущие кромки срезают более толстые стружки, чем выходная режущая кромка 3 [9]. Вершинная стружка прижимает стружку, сходящую с выходной режущей кромки, к передней поверхности и затрудняет ее сход. Стружка, срезанная вершинной режущей кромкой, отклоняется от стружки, сходящей с входной режущей кромки, и подвергается высокой растягивающей нагрузке, что приводит к разрыву промежуточной зоны стружки между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка, после которого обе стружки сходят беспрепятственно и не вызывают высоких механических или температурных деформаций на границе между вершинной и входной режущими кромками. Тонкая стружка, срезанная выходной режущей кромкой зуба, также отделяется от толстой стружки, сходящей с вершинной режущей кромки. Эта стружка выдавливается толстыми стружками в зазор между боковой стороной зуба долбяка и обрабатываемой поверхностью, где она истирается на участке стыка вершинной и выходной режущих кромок. Здесь образуется лунка локального износа по передней поверхности. Расстояние от выходной режущей кромки до центра лунки зависит от круговой подачи. При ее увеличении это расстояние также увеличивается.

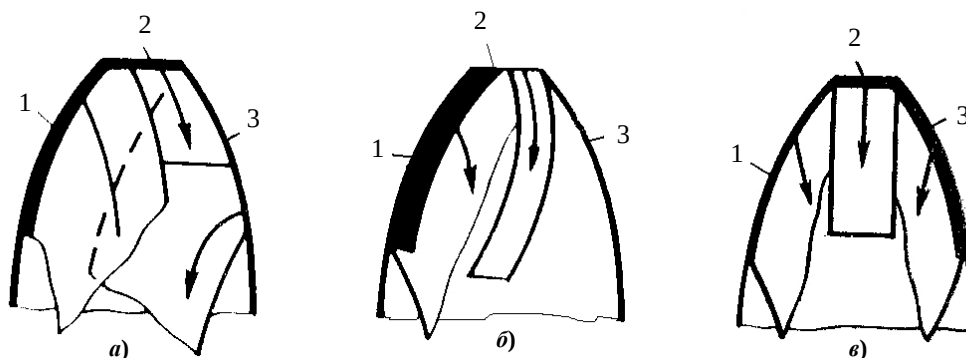


Рисунок 3 – Сход стружек при зубодолблении

При обкатном зубодолблении износ наблюдается по периметру всех режущих кромок. Причем его интенсивность нарастает от основания к вершинной режущей кромке. Однако лимитирует размерную стойкость долбяков лунка локального износа по передней поверхности у выходной режущей кромки. Данное явление представляет собой специфический парадокс процесса обкатного зубодолбления, так как оно возникает на участке, срезающем минимальные по толщине стружки. Постепенное увеличение лунки локального износа приводит к разрушению выходной режущей кромки по передней поверхности у вершин зубьев долбяка. Для снижения интенсивности развития лунки локального износа можно использовать технологический прием, заключающийся в изменении направления движения обката перед обработкой очередной заготовки. В этом случае лунки локального износа образуются симметрично на входной и выходной режущих кромках. Однако интенсивность их развития замедляется примерно в два раза.

Наряду с указанным технологическим приемом рассмотрим на основе анализа схода стружек еще два возможных пути существенного замедления лунки локального износа. Первый путь связан с такой модификацией классической схемы, которая обеспечит срезание вместо *U*-образной более простой *L*-образной стружки. Такой тип стружки, срезанной входной 1 и вершинной 2 режущими кромками, представлен на рисунке 3, б. Выходная режущая кромка в резании не участвует, *L*-образная стружка после разрыва промежуточной зоны между вершинной и входной режущими кромками зуба долбяка сходит беспрепятственно и не вызывает высоких деформаций на границе между этими режущими кромками.

Второй путь – создание условий резания, при которых толщина стружки, срезаемой входной и выходной режущими кромками, будет одинакова (рис. 3, в). В этом случае стружки, имеющие одинаковую толщину, вызывают равную взаимную деформацию и сходят в стыке между вершинной и боковыми режущими кромками в одинаковых условиях. Вследствие взаимной деформации передняя поверхность зубьев долбяка подвергается равномерной силовой и тепловой нагрузке. Образование зоны локализованного износа сдвигается во времени и одновременно происходит ее перераспределение на обе боковые режущие кромки. Таким образом, лунки локального износа на передней поверхности появляются в окрестностях вершинной режущей кромки у обеих боковых режущих кромок. Однако интенсивность их развития также замедляется примерно в два раза, что, соответственно, увеличивает период размерной стойкости долбяков.

Многопроходное зубодолбление с увеличенными круговыми подачами. При традиционном однопроходном зубодолблении нормальными долбяками создание условий для срезания L -образной стружки невозможно, а при двух-трехпроходном – практически неэффективно. Поэтому в области конструирования зубодолбежных станков ведущих станкостроительных фирм произошел переход от классического одно – трехпроходного зубодолбления к многопроходному при 6...10 проходах с увеличенными на порядок круговыми подачами до 3,5...4,5 мм/двойной ход долбяка на предварительных черновых и получистовых проходах. Такой режим при сохранении производительности традиционного зубодолбления с малыми круговыми подачами обеспечивает повышение периода размерной стойкости зуборезных долбяков. Объясняется это следующими обстоятельствами. С увеличением круговой подачи толщина стружки возрастает, одновременно уменьшается ее длина, т.е. происходит перераспределение параметров сечения стружки. При этом количество срезаемых стружек уменьшается примерно на порядок. Увеличение толщины стружек, срезаемых выходной режущей кромкой, обеспечивает более благоприятные условия их схода и, как следствие, лунку локального износа сдвигает к центру передней поверхности зуба. Интенсивность развития лунки локального износа заметно замедляется. Кроме того, каждый зуб долбяка, срезая существенно меньшее количество стружек, меньше нагревается. В результате возрастает термостойкость режущих кромок зубьев.

При многопроходном зубодолблении с увеличенными круговыми подачами можно создать условия для срезания на проходах как симметричной U -образной, так и L -образной стружки. Рассмотрим решение данной задачи, предложенное в [11]. При врезании перед очередным проходом долбяку сообщают угловое смещение, противоположное его круговой подаче, и одновременно измеряют момент силы резания. При достижении моментом силы резания нулевого значения, что соответствует одинаковой по толщине стружки, срезаемой обеими боковыми режущими кромками, угловое смещение долбяка прекращают. В итоге на проходе будет срезаться U -образная стружка, имеющая одинаковую толщину на боковых режущих кромках. Из описания принципа функционирования рассматриваемого технического решения, признанного изобретением, следует, что этот способ содержит подсистему стабилизации момента силы резания, обеспечивающую повышение периода размерной стойкости долбяка посредством создания условий для срезания симметричной U -образной стружки на каждом проходе, кроме первого. Источником информации и энергии для подсистемы стабилизации силового воздействия является среда резания. В свою очередь, эта подсистема является источником информации для структуры врезания кинематической подсистемы способа многопроходного зубодолбления [12].

При зубодолблении с L -образной стружкой на втором и последующих, кроме последнего, проходах при каждом последующем врезании угловое смещение долбяка изменяют на противоположное. Одновременно измеряют момент силы резания. При достижении моментом силы резания максимального значения, что соответствует максимальной по толщине стружки, срезаемой одной из боковых режущих кромок, угловое смещение долбяка прекращают. В итоге на проходе будет срезаться L -образная стружка. На последнем, чистовом, проходе срезание припуска должно осуществляться в виде U -образной стружки.

При большом количестве проходов возрастает машинное время врезания, выполняемое перед каждым проходом. Этот недостаток устранен в способе зубодолбления [13], используемом в зубодолбежных станках с ЧПУ фирмы «Лоренц» (ФРГ) [14; 15], по которому на предварительных проходах врезание осуществляют непрерывно по спирали. В приведенных источниках правило выполнения подач, воспроизводящих спиральное врезание, не рассматривается. Поэтому подробно рассмотрим вывод этого правила.

При постоянных значениях подачи радиального врезания и круговой подачи на этапе предварительных проходов при непрерывном врезании долбяка 2 относительно заготовки 1 действительная траектория врезания имеет вид архимедовой спирали 3 (рис. 4). Результирующая (спиральная) подача врезания долбяка равна геометрической сумме составляющих ее подач:

$$S_d = \sqrt{S_K^2 + S_P^2},$$

где S_d – действительная (спиральная) подача врезания, мм/двойной ход долбяка; S_K – круговая подача, мм/двойной ход долбяка; S_P – радиальная подача врезания, мм/двойной ход долбяка.

Круговая подача является нормируемой величиной, устанавливаемой при назначении режимов резания. Тогда радиальную подачу можно определить как часть круговой подачи, используя принцип пропорциональности перемещений:

$$S_p = S_k \frac{h}{L},$$

где h – величина радиального перемещения долбяка, принимаемая на этапе черновых проходов, мм; L – длина архимедовой спирали между точками A и B , по которой перемещается долбяк относительно заготовки, мм.

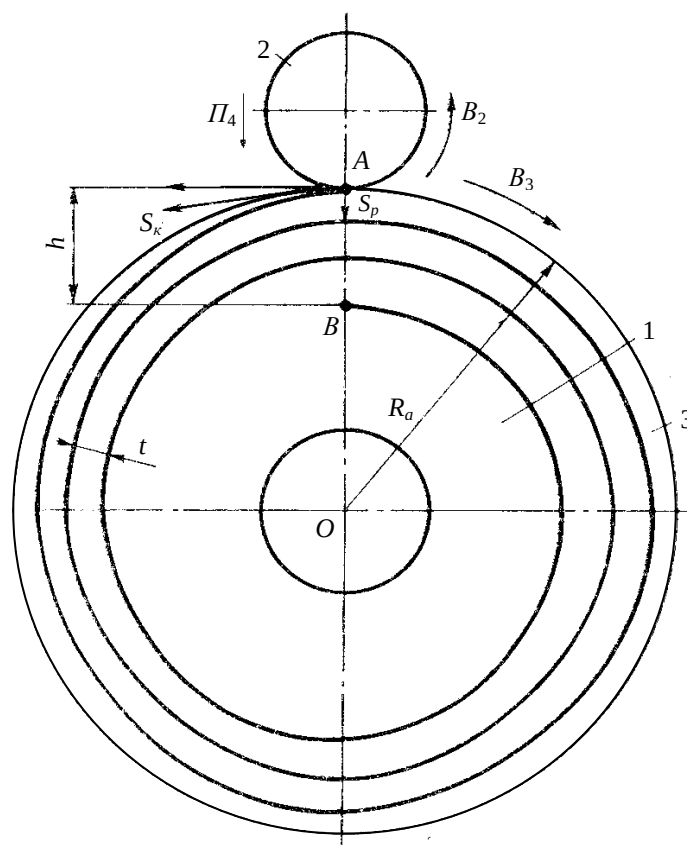


Рисунок 4 – Траектория движения долбяка при врезании по спирали

Известно, что длина архимедовой спирали [14], начиная от полюса, определяется по формуле:

$$l = \frac{a}{2} \left(\varphi \sqrt{1 + \varphi^2} \operatorname{Arsh} \varphi \right),$$

где l – длина архимедовой спирали, мм; a – параметр архимедовой спирали, мм; φ – угол поворота радиус-вектора точки в полярных координатах, рад.

Следовательно, длину архимедовой спирали, по которой перемещается долбяк на этапе врезания, можно определить как разность длин спиралей: полюс O – точка A , полюс O – точка B . После элементарных преобразований получим

$$L = \frac{a}{2} \left[\left(\varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2} \right) + \left(\operatorname{Arsh} \varphi_2 - \operatorname{Arsh} \varphi_1 \right) \right].$$

Здесь φ_1 и φ_2 – углы поворота заготовки в движении обката по длине архимедовой спирали на участках соответственно от полюса до точки B и от полюса до точки A .

Углы φ_1 и φ_2 определим из выражений:

$$\varphi_1 = 2\pi \frac{R_a - h}{a}; \quad \varphi_2 = 2\pi \frac{R_a}{a},$$

где R_a – радиус окружности выступов обрабатываемого колеса, мм.

Параметр a и шаг t архимедовой спирали связаны следующим соотношением:

$$T = 2\pi a.$$

Шаг архимедовой спирали при зубодолблении можно выразить через количество проходов κ :

$$t = h / \kappa.$$

Следовательно,

$$a = h / 2\pi \kappa.$$

В выражении для определения L второе слагаемое, представляющее разность обратных гиперболических синусов в пределах приемлемого числа предварительных проходов, не превышает 0,1 мм. Поэтому этим слагаемым можно пренебречь при практических расчетах. После подстановки значения L в выражение для S_p окончательно получим:

$$S_p = \frac{2S_\kappa h}{a(\varphi_2 \sqrt{1 + \varphi_2^2} - \varphi_1 \sqrt{1 + \varphi_1^2})}.$$

Особенность кинематической подсистемы рассматриваемого способа зубодолбления – сложная двухэлементарная группа врезания $Bp(B_2\Pi_4)$, элементарное движение B_2 которой входит также в структуру группы движения профилирования (обката) $\Phi_n(B_2B_3)$. Функционируют эти группы последовательно по следующему правилу: многопроходное спиральное врезание на предварительных проходах, затем профилирование на чистовом проходе.

Синергетическая модель целенаправленного развития открытого множества обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес. Рассмотренный пионерный способ обкатного зубодолбления с радиальным врезанием и производные от него первообразные способы с касательным врезанием и со спиральным врезанием на первом уровне системного описания их кинематической подсистемы различаются только видом врезания. С позиций синергетики данная триада на поле ветвящихся виртуальных путей эволюции открытого множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес [17] в точке бифуркации образует аттрактор (коридор целенаправленного развития) способов обкатного зубодолбления. Анализ патентных и других библиографических источников показал, что этот аттрактор содержит значительный массив способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес, аналогами которых являются способы названной триады. Следовательно, данный аттрактор можно рассматривать как поле эволюции открытого множества способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес, состоящее из трех подмножеств, различающихся видом движения врезания (рис. 5).

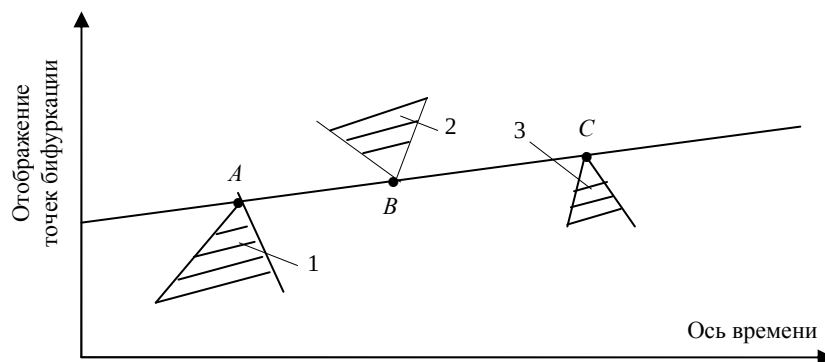


Рисунок 5 – Поле ветвящихся путей целенаправленного развития подмножеств способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес

В точке бифуркации A аттрактор 1 пионерного способа обкатного зубодолбления содержит значительный массив траекторий эволюции подмножества способов обкатного зубодолбления с радиальным врезанием прямозубых и косозубых колес, зубчатых венцов колес внутреннего зацепления, зубчатых секторов, колес с наклонными по делительной окружности зубьями. Характерной особенностью данного массива являются траектории, основанные в основном на изменении последовательности и правил выполнения приемов как пионерного, так и производных от него способов. В точке бифуркации B аттрактор 2 первообразного способа обкатного зубодолбления с касательным врезанием содержит массив эволюции подмножества способов зубодолбления цилиндрических колес внешнего зацепления. Однако наиболее рациональная область использования – долбление одним долбяком параллельно и последовательно двух

зубчатых колес, зубчатых колес при их планетарном движении относительно долбяка и при совмещении зубодолбления с роторным перемещением пар долбяк – нарезаемое колесо. В точке бифуркации *C* аттрактор 3 первообразного способа обкатного зубодолбления со спиральным врезанием содержит незначительный массив подмножества способов обкатного зубодолбления. Объясняется это тем, что эти способы осуществимы в основном в мехатронных обрабатывающих системах, т.е. на зубодолбежных станках с ЧПУ.

Заключение. С позиций системологии рассмотрены пионерный способ обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес с радиальным врезанием и ряд производных от него способов с касательным и спиральным врезанием. На этой основе предложена модель целенаправленной эволюции обкатного зубодолбления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гир-Шепер, Ф. Зубодолбежный станок / Ф. Гир-Шепер. – М., 1914.
2. Голембиевский, А.И. Синергетическая модель эволюции множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 17–22.
3. Способ нарезания цилиндрических колес: пат. 475761 (СССР), МКИ В 23F 5/12 / М. Тиксье // Открытия. Изобретения. – 1975. – № 24.
4. Голембиевский, А.И. Системный анализ процесса зубодолбления / А.И. Голембиевский. – Минск: Наука и техника, 1993.
5. Матюшин, В.М. Зубодолбление / В.М. Матюшин. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. и судостроит. лит., 1953.
6. Zařizení k přidavnému pootáčení nástroje odvalovacích obrážecích na ozubení: Patent 123494 (CSR), MKU МКИ В 23F 5/12.
7. Verschleiss untersuchungen beim Walzstosstn von Geradverzahnungen / H. Opitz u. a. // Bericht des Landes Nordrhein-Westfalen. – 1974. – № 2401. – S. 64.
8. Способ долбления цилиндрических зубчатых колес: авт. свид. 698732 (СССР) МКИ В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. 1979. – № 43.
9. Кениг, Г. Стружкообразование и износ инструмента при зубодолблении / Г. Кениг, К. Бузакис // Экспресс-информация, режущие инструменты. – М.: ВИНТИ, 1989.
10. Vaida, A. Studium formej aschiilor la mortezarea rotilor dintate cu cu-roata, in vederea determinarii fortelor de achiere / A. Vaida, G. Bejnaru // Buletinul universitatii din Brasov. – 1979. – A 21. – S. 41–48.
11. Способ долбления зубчатых колес: пат. 1641534 (СССР) МКИ В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 14.
12. Голембиевский, А.И. Анализ способов формообразующей обработки с позиций общей теории систем / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 139–146.
13. Способ обработки зубчатых колес: пат. 1763112 (СССР) МКИ В 23F 5/12 / А.И. Голембиевский // Открытия. Изобретения. – 1992. – № 35.
14. Каталог зубодолбежных станков фирмы «Lorenz». – Ettlingen, 1988.
15. Walzstossen in Eteppen // Maschine. – 1991. – Vol. 45, № 6. – S. 75–78.
16. Заманский, М.С. Введение в современную алгебру и анализ / М.С. Заманский. – М.: Наука, 1974.
17. Голембиевский, А.И. Синергетическая модель эволюции множества способов нарезания цилиндрических зубчатых колес / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 17–22.

Поступила 08.12.2015

PURPOSEFUL EVOLUTION OF SET WAYS TO ROUNDING GEAR SLOTING OF CYLINDRICAL GEARS

A. GOLEMBIEVSKI

With the system positions pioneering method of rounding gear-slotting of cylindrical gears with radial incision and its derivatives primitives ways with tangential incision and with a spiral incision are described. Specific characteristics of rounding gear-slotting are analyzed – the phenomenon of chip formation erases and features – and ways of minimizing the impact of it phenomena on the dimensional stability of gear cutting cutters are discussed. From the position of synergy that on the branching paths of evolution of an open set ways processing of cylindrical gears, rounding gear-slotting forms attractor (corridor) focused subsets of flow forming methods of gear-slotting differing views of plunging movement are showed.

Keywords: rounding gear-slotting, evolution, cylindrical gears, dimensional resistance, maximization.

УДК 621.9.06

**СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МНОГОНАПРАВЛЕННОЙ
ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

д-р техн. наук, проф. И.А. КАШТАЛЬЯН; Б. ОРУКАРИ; Л.М. ДУБИНА
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Демонстрируются результаты экспериментальных исследований стойкости режущего инструмента. Показаны особенности процесса резания при многонаправленной токарной обработке на станках с числовым программным управлением. Представлена математическая модель, устанавливающая взаимосвязь размерной стойкости режущего инструмента с режимами резания при многонаправленной токарной обработке наружных поверхностей вращения.

Ключевые слова: числовое программное управление, многонаправленная токарная обработка, режимы резания, стойкость режущего инструмента.

Относительная доля оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) в станочном парке предприятий машиностроения постоянно возрастает и в этой связи все более актуальными становятся вопросы их эффективной эксплуатации. Одним из путей решения этой задачи при изготовлении деталей сложной формы на токарных станках с ЧПУ является многонаправленная обработка. Ее использование позволяет ограничить число инструментов в инструментальной наладке, уменьшить вспомогательное время на поиск и смену инструмента, а в отдельных случаях исключить время на переустановку заготовки. При многонаправленной токарной обработке (МТО) в широких пределах изменяются геометрические параметры сечения срезаемого слоя и кинематические углы режущего лезвия инструмента. Это определяет условия протекания пластического деформирования в зоне резания, приводит к изменению скоростей сдвига и размеров зоны пластической деформации. Как следствие, изменяется площадь контакта режущей части резца с металлом и условия трения по передней и задней поверхностям, что отражается на силовом и температурном режимах обработки. От указанных факторов в значительной степени зависит стойкость режущего инструмента, которая в свою очередь оказывает влияние на точность обработки и качество поверхности. В этой связи возникает необходимость в исследованиях влияния параметров режимов резания при МТО на стойкость режущего инструмента.

Основная часть. Сущность МТО заключается в том, что вместо нескольких стандартных или специальных резцов различного назначения используют один канавочный (прорезной) резец, режущая пластина которого имеет возможность разворачиваться так, что между ее главной режущей кромкой и направлением продольной подачи образуется вспомогательный угол в плане φ_2 [1]. При этом резец может работать либо как канавочный (с подачей в поперечном направлении и вспомогательными углами в плане φ_1), либо как правый или левый проходной (с подачей в осевом направлении и вспомогательным углом в плане φ_2). Фактически одним резцом обеспечивается формообразование открытых, полуоткрытых и закрытых поверхностей деталей, а также различных дополнительных поверхностей (канавок, проточек, желобов).

Образование угла φ_2 может быть обеспечено путем использования дополнительной управляемой координаты и специального резцедержателя для разворота резца или за счет изгибных деформаций державки инструмента осевыми (продольными) силами резания [2; 3]. Каждый из обозначенных вариантов решения задачи имеет свои недостатки. Первый вариант связан с усложнением конструкции револьверной головки и, как следствие, с дополнительными затратами на изготовление станка. Недостатком второго варианта является изменение фактической длины инструмента вследствие изгибных деформаций при обработке с продольной подачей, что влияет на получаемый в результате обработки диаметральный размер. Фактически имеет место дополнительная составляющая погрешности обработки, обусловленная переменным характером изгибных деформаций державки резца. При нестационарном резании (колебания припуска и твердости обрабатываемого материала, непостоянство режимов резания и т.д.) ее прогнозирование является достаточно сложным. Указанные недостатки можно устранить, если обработку вести резцом, конструктивная схема которого представлена на рисунке 1 [4].

В державке 1 резца (см. рис. 1) между двумя щеками, образованными сквозным V-образным пазом, закреплена пластина 2, изготовленная из стали с высокими упругими свойствами, например, стали 65Г (45...50 HRC). На другом конце пластины 2 закреплена режущая пластина 3, разворот которой при наличии осевой составляющей силы резания P_x ограничен винтами 4. Для увеличения жесткости резца в направлении действия тангенциальной составляющей P_z силы резания предусмотрена дополнительная опора в виде пальца 5. Пластина 2 работает как плоская пружина с заделкой в точке К.

Под действием составляющей силы резания P_x пластина деформируется (изгибается) в направлении действия этой силы (перпендикулярно к боковой поверхности проточки). Величина изгиба f_n при этом определяется по известной зависимости [5]:

$$f_n = \frac{4l_n^3 P_x}{h_n b_n^3 E}, \quad (1)$$

где l_n – длина консольной части пластины, м; h_n и b_n – высота и ширина ее поперечного сечения соответственно, м; E – модуль упругости материала пластины, Па.

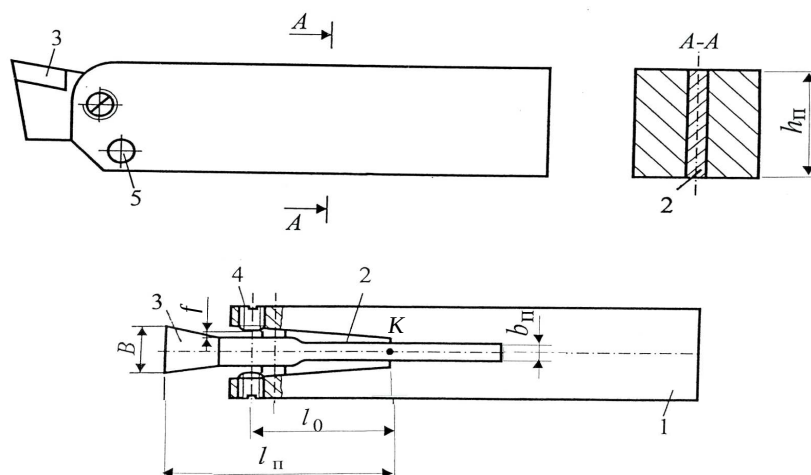


Рисунок 1 – Конструктивная схема резца

Схема обработки закрытой поверхности представлена на рисунке 2. Согласно этой схеме резцу с длиной главной режущей кромки B настроены точками C и D (их исходное положение C_1 и D_1) и вспомогательными углами в плане φ_1 сообщают перемещение в поперечном направлении (врезание) на

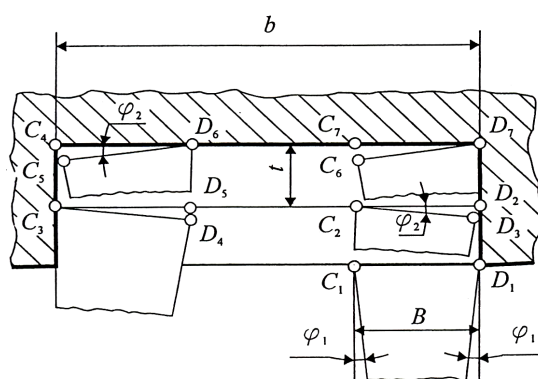


Рисунок 2 – Схема обработки закрытой поверхности

глубину t с подачей на оборот заготовки $S_{об}$, при этом настроенные точки занимают положение C_2 и D_2 . Далее режущая кромка резца разворачивается относительно точки C_2 так, что между ней и направлением, перпендикулярным к правой боковой поверхности проточки, образуется угол φ_2 (всегда $\varphi_2 \leq \varphi_1$). После разворота резцу сообщают продольную подачу на оборот $S_{оп}$ в направлении левой боковой поверхности проточки. При этом он работает как проходной с главным углом в плане $\varphi = 90^\circ + \varphi_1 - \varphi_2$ и вспомогательным φ_2 . Когда настроенная точка C будет находиться в крайнем левом положении (точка C_3), режущую кромку разворачивают относительно этой точки в исходное положение ($\varphi_2 = 0$) и производят последующее врезание на глубину t . Затем режущую кромку разворачивают с образованием угла φ_2 относительно настроенной точки D , которая находится в положении D_5 , и сообщают резцу продольную подачу в направлении правой боковой поверхности проточки. После завершения этого перемещения режущую кромку возвращают в исходное положение для очередного врезания. Такие движения повторяются до полного формообразования проточки по глубине. Разворот главной режущей кромки резца относительно настроенных его точек осуществляется за счет изгибных деформаций упругой пластины под действием осевой составляющей силы резания и перемещения точки K , принадлежащей державке резца, по дуге окружности (см. рис. 1) [6].

Экспериментальные исследования стойкости режущего инструмента при МТО выполнялись с использованием токарного станка с ЧПУ мод. 1А751Ф3. Прорезными (канавочными) резцами с режущими пластинами из твердого сплава Т15К6 обрабатывали проточки (канавки) прямоугольной формы шириной 52 и глубиной 15 мм на наружной поверхности заготовки из стали 40Х (диаметр 220, длина 115 мм). Заготовка, закрепленная в патроне, вращалась с частотой 125 об/мин, что обеспечивало максимальное значение скорости резания 86,35 м/мин. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) применяли эмульсию, изготовленную из эмульсола НГЛ-205.

Заготовки были разделены на две группы. Первую группу заготовок обрабатывали по схеме, предложенной в настоящей работе, с использованием специального резца (см. рис. 1) со следующими параметрами: $B = 12$ мм; $l_n = 60$ мм; $l_0 = 40$ мм; $b_n = 4$ мм; $h_n = 24$ мм; геометрические параметры: $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 8^\circ$; $\varphi_1 = 2^\circ$; $r = 0,3$ мм. Подача в поперечном направлении (врезание) $S_{0в} = 0,12$ мм/об; рабочие перемещения в продольном направлении выполняли с $t = 3$ мм и $S_{0п} = 0,25$ мм/об. Разворот главной режущей кромки после каждого врезания производили на угол $\varphi_2 = 1^\circ 40'$. Вторую группу заготовок обрабатывали по схеме «спуск» стандартным канавочным резцом (материал режущей части и геометрические параметры те же, что и при обработке заготовок первой группы) [7]. Выполняли пять рабочих ходов в направлении, перпендикулярном к главной режущей кромке, с подачей 0,12 мм/об и чистовой рабочий ход. Резцы доводились алмазным кругом. В качестве СОЖ применялась эмульсия, изготовленная также из эмульсола НГЛ-205. Цикл обработки задавали в виде подпрограммы, составленной с использованием формальных параметров под адресом R . Вызов подпрограммы и число ее повторов задавали в кадре управляющей программы под адресом L . В этом же кадре указывали требуемые значения формальных параметров [7].

Износ резцов оценивался по ширине площадки износа на задней поверхности h_3 и размеру лунки (глубине h_d и ширине b_d) на передней. Ширина площадки износа измерялась с помощью универсального измерительного микроскопа модели УИМ-23. Для измерения глубины лунки был использован индикатор часового типа модели 1-МИГ. С помощью профилографа-профилометра мод. 201 производилась также запись профиля лунки в направлении вспомогательной режущей кромки резца. Фиксация размерного износа осуществлялась путем измерения длины главной режущей кромки резца с помощью вертикального оптиметра ОВО-1 и длины резца окуляр-микрометром электронным МОЭ-4-15 НПО «Планар» (Республика Беларусь) с ценой деления 0,1 мкм. Температура резца при измерениях размерного износа фиксировалась хромель-копелевыми термопарами, которые вставлялись в отверстия, выполненные в боковой стенке державки. Зависимости ширины площадки износа по задней поверхности h_3 и глубины лунки h_d на передней от пути резания L_p при скорости резания $v = 86,35$ м/мин представлены на рисунке 3.

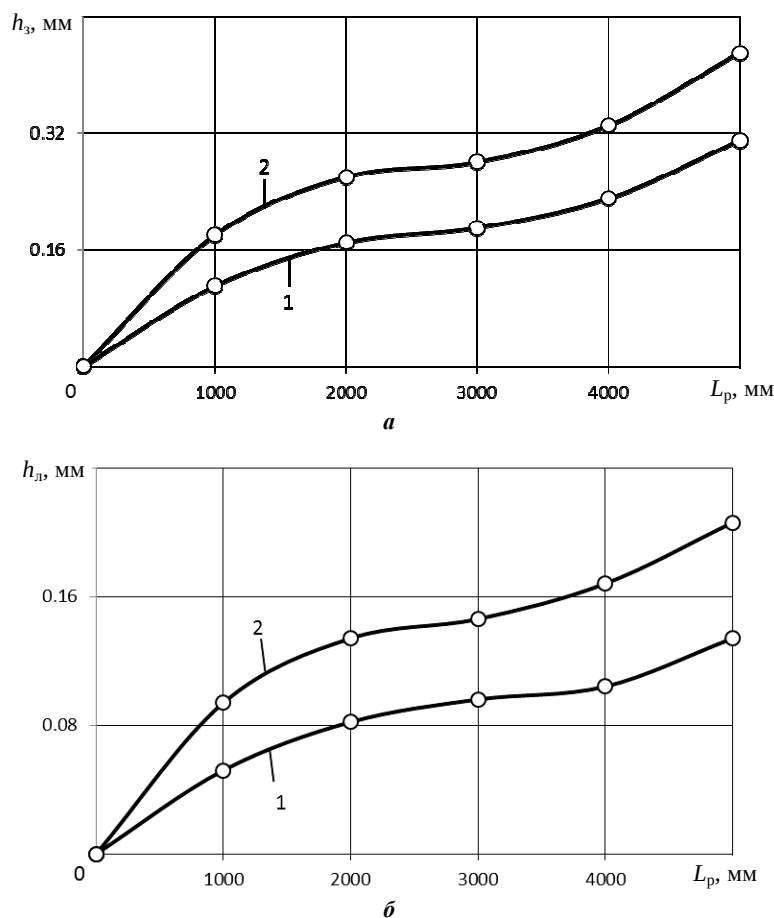


Рисунок 3 – Зависимости ширины площадки износа на задней поверхности h_3 (а) и глубины лунки h_d (б) на передней поверхности резца от пути резания L_p при МТО (1), при точении по схеме «спуск» (2)

Графики (см. рис. 3, а, б) строились по средним значениям тридцати замеров. Интервальная оценка среднего значения, а также сравнение дисперсий и средних производились согласно работе [8].

В соответствии со схемой МТО, представленной на рисунке 2, путь резания L_p будет состоять из пути резания с подачей врезания L_{pv} и пути резания с продольной подачей L_{pn} :

$$L_p = L_{pv} + L_{pn}. \quad (2)$$

Для определения L_{pv} и L_{pn} получены следующие зависимости:

$$L_{pv} = \frac{(D_{вн} + D_{вк})\pi a}{2000S_{O_n}}, \quad (3)$$

$$L_{pn} = \frac{(b-B) \cdot (D_{вн} + D_{вк})\pi a}{2000tS_{O_n}}, \quad (4)$$

где a – глубина проточки, мм; b – ширина проточки, мм; B – длина главной режущей кромки резца, мм; $D_{вн}$ – диаметр выборки начальный, мм; $D_{вк}$ – диаметр выборки конечный, мм; S_{O_n} – подача поперечная (врезания), мм/об; S_{O_n} – подача продольная, мм/об.

Подставив в выражение (2) значения L_{pv} и L_{pn} из выражений (3) и (4) соответственно, получим зависимость для определения L_p при реализации цикла обработки закрытой поверхности вращения:

$$L_p = \frac{\pi a (D_{вн} + D_{вк})}{2000} \cdot \left(\frac{1}{S_{O_n}} + \frac{b-B}{tS_{O_n}} \right).$$

Из графиков, представленных на рисунке 3, видно, что при МТО наблюдается некоторое уменьшение износа по передней и задней поверхностям. Это можно объясняется тем, что по предложенной схеме правая и левая вспомогательные режущие кромки резца участия в резании поочередно не принимают. Кроме того, улучшается отвод стружки и доступ СОЖ в зону резания.

Размерную стойкость инструмента можно характеризовать продолжительностью его работы без подналадки или замены, количеством обработанных заготовок, площадью обработанной поверхности, объемом снятого материала и длиной пути резания. Однако эти характеристики непригодны для выбора оптимальных условий формообразования, поскольку не учитывают уровни скорости резания и допустимого затупления. Более объективными при этом являются показатели относительного размерного износа. В качестве такого показателя был использован линейный износ, отнесенный к 1000 м пути резания h_0 .

Величина h_0 подсчитывается по следующей зависимости: $h_0 = 1000h_p / L_p$, где h_p – размерный износ в микрометрах; L_p – общая длина пути резания в метрах.

Предварительные исследования, выполненные по методике [9], разработанной в МВТУ им. Баумана Д.Д. Медведевым, показали, что взаимосвязь различных параметров, влияющих на относительный размерный износ режущего инструмента при МТО, достаточно точно выражается эмпирической зависимостью, которая описывается степенной функцией следующего вида:

$$h_0 = C_h \cdot t^{\alpha_h} \cdot v^{\beta_h} \cdot S_{O_n}^{\gamma_h} \cdot K_{S_o}^{\varepsilon_h} \cdot K_{L_p}^{\lambda_h}, \quad (5)$$

где C_h – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и материала режущего инструмента; t – глубина резания, мм; v – скорость резания, м/мин; S_{O_n} – продольная подача, мм/об; K_{S_o} – отношение продольной подачи S_{O_n} к поперечной подаче S_{O_n} ; K_{L_p} – отношение пути резания с продольной подачей L_{pn} к длине резания с подачей врезания L_{pv} ; α_h , β_h , γ_h , ε_h , λ_h – показатели степени (зависят от обрабатываемых материалов и условий обработки).

Для процесса МТО параметры режима резания изменялись в следующих диапазонах: $t = 1,0 \dots 4,0$ мм; $v = 80 \dots 160$ м/мин; $S_{O_n} = 0,15 \dots 0,65$ мм/об; $K_{S_o} = 2 \dots 7$; $K_{L_p} = 2 \dots 12$.

Для установления зависимости (5) использован метод наименьших квадратов.

Логарифмируя уравнение (5), получим

$$\lg h_0 = \lg C_h + \alpha_h \lg t + \beta_h \lg v + \gamma_h \lg S_{O_n} + \varepsilon_h \lg K_{S_o} + \lambda_h \lg K_{L_p}. \quad (6)$$

Полагая, что $\lg h_0 = h_0^1$; $\lg C_h = C$; $\lg t = t^1$; $\lg v = v^1$; $\lg S_{O_n} = S_{O_n}^1$; $\lg K_{S_o} = K_{S_o}^1$; $\lg K_{L_p} = K_{L_p}^1$, находим

$$h_0^1 = C + \alpha_h t^1 + \beta_h v^1 + \gamma_h S_{O_n}^1 + \varepsilon_h K_{S_o}^1 + \lambda_h K_{L_p}^1. \quad (7)$$

Используя условие Гаусса, можно получить следующие нормальные уравнения:

$$-\sum_1^n h^1 + \sum_1^n C + \alpha_h \sum_1^n t^1 + \beta_h \sum_1^n v^1 + \gamma_h \sum_1^n S_{O_n}^1 + \varepsilon_h \sum_1^n K_{S_o}^1 + \lambda_h \sum_1^n K_{L_p}^1 = 0, \quad (8)$$

$$-\sum_1^n t^1 h_0^1 + C \sum_1^n t^1 + \alpha_h \sum_1^n (t^1)^2 + \beta_h \sum_1^n v^1 t^1 + \gamma_h \sum_1^n S_{O_n}^1 t^1 + \varepsilon_h \sum_1^n K_{S_o}^1 t^1 + \lambda_h \sum_1^n K_{L_p}^1 t^1 = 0, \quad (9)$$

$$-\sum_1^n v^1 h_0^1 + C \sum_1^n v^1 + \alpha_h \sum_1^n t^1 v^1 + \beta_h \sum_1^n (v^1)^2 + \gamma_h \sum_1^n S_{O_n}^1 v^1 + \varepsilon_h \sum_1^n K_{S_o}^1 v^1 + \lambda_h \sum_1^n K_{L_p}^1 v^1 = 0, \quad (10)$$

$$-\sum_1^n S_{O_n}^1 h_0^1 + C \sum_1^n S_{O_n}^1 + \alpha_h \sum_1^n t^1 S_{O_n}^1 + \beta_h \sum_1^n v^1 S_{O_n}^1 + \gamma_h \sum_1^n (S_{O_n}^1)^2 + \varepsilon_h \sum_1^n K_{S_o}^1 S_{O_n}^1 + \lambda_h \sum_1^n K_{L_p}^1 S_{O_n}^1 = 0, \quad (11)$$

$$-\sum_1^n K_{S_o}^1 h_0^1 + C \sum_1^n K_{S_o}^1 + \alpha_h \sum_1^n t^1 K_{S_o}^1 + \beta_h \sum_1^n v^1 K_{S_o}^1 + \gamma_h \sum_1^n S_{O_n}^1 K_{S_o}^1 + \varepsilon_h \sum_1^n (K_{S_o}^1)^2 + \lambda_h \sum_1^n K_{L_p}^1 K_{S_o}^1 = 0, \quad (12)$$

$$-\sum_1^n K_{L_p}^1 h_0^1 + C \sum_1^n K_{L_p}^1 + \alpha_h \sum_1^n t^1 K_{L_p}^1 + \beta_h \sum_1^n v^1 K_{L_p}^1 + \gamma_h \sum_1^n S_{O_n}^1 K_{L_p}^1 + \varepsilon_h \sum_1^n K_{S_o}^1 K_{L_p}^1 + \lambda_h \sum_1^n (K_{L_p}^1)^2 = 0. \quad (13)$$

Решая эти уравнения, определяем неизвестные: C , α_h , β_h , γ_h , ε_h , λ_h .

На основании экспериментальных данных (измерялась длина главной режущей кромки резца), представленных в таблице, получены уравнения (14)–19.

Результаты экспериментальных исследований размерной стойкости режущего инструмента при МТО

№ опыта	t, мм	v, м/мин	S_{O_n} , мм/об	K_{S_o}	K_{L_p}	h_0 , мкм/км
1	1,0	80,0	0,15	7,0	12,0	0,7324
2	4,0	80,0	0,15	7,0	2,0	0,7160
3	1,0	160,0	0,15	2,0	12,0	0,8976
4	4,0	160,0	0,15	2,0	2,0	0,8808
5	1,0	80,0	0,65	7,0	2,0	0,7709
6	4,0	80,0	0,65	7,0	12,0	0,7853
7	1,0	160,0	0,65	2,0	2,0	0,9085
8	4,0	160,0	0,65	2,0	12,0	0,9191
9	1,5	100,0	0,25	6,0	4,0	0,7924
10	2,0	120,0	0,35	5,0	6,0	0,8062
11	2,5	140,0	0,45	4,0	8,0	0,8261
12	3,0	150,0	0,55	3,0	10,0	0,8692

$$-9,9045 + 12C + 3,7605\alpha_h + 24,8302\beta_h - 5,7084\gamma_h + 8,8042\varepsilon_h + 9,9045\lambda_h = 0, \quad (14)$$

$$-3,1632 + 3,7605C + 2,1019\alpha_h + 7,8261\beta_h - 1,7247\gamma_h + 2,1946\varepsilon_h + 2,8386\lambda_h = 0, \quad (15)$$

$$-20,6664 + 24,8302C + 5,5243\alpha_h + 51,5830\beta_h - 11,7663\gamma_h + 14,4370\varepsilon_h + 18,2338\lambda_h = 0, \quad (16)$$

$$4,6482 - 5,7084C - 1,6496\alpha_h - 11,7650\beta_h + 3,6132\gamma_h - 3,4374\varepsilon_h - 4,0802\lambda_h = 0, \quad (17)$$

$$-5,7175 + 7,0608C + 2,2142\alpha_h + 14,4170\beta_h - 3,3376\gamma_h + 4,9035\varepsilon_h + 5,1968\lambda_h = 0, \quad (18)$$

$$-7,3045 + 8,8042C + 2,8396\alpha_h + 18,2738\beta_h - 4,0839\gamma_h + 5,1970\varepsilon_h + 7,8037\lambda_h = 0. \quad (19)$$

Решая систему шести уравнений с шестью неизвестными, находим их значения:

$$C = -0,5057; \alpha_h = 0,0181; \beta_h = 0,6647; \gamma_h = 0,0546; \varepsilon_h = -0,0050; \lambda_h = -0,0245.$$

Тогда зависимость для определения относительного размерного износа резцов из твердого сплава Т15К6 при обработке конструкционной стали 45 с модулированной подачей будет иметь вид

$$h_0 = 0,312 \cdot t^{0,018} \cdot v^{0,665} \cdot S_{O_n}^{0,055} \cdot K_{S_0}^{-0,005} \cdot K_{L_p}^{-0,025}. \quad (20)$$

Анализ зависимости (20) показывает, что параметры режимов резания оказывают заметное влияние на размерную стойкость режущего инструмента, причем наибольшее влияние оказывает скорость резания. С ростом ее значений размерная стойкость резцов уменьшается.

Из параметров, характеризующих МТО, наибольшее влияние на размерную стойкость оказывает соотношение пути резания в продольном и поперечном направлениях, которое зависит от геометрических параметров зоны выборки и длины главной режущей кромки резца.

Заключение. Включение в циклы МТО рабочего движения с продольной подачей и предварительным разворотом главной режущей кромки прорезного резца относительно настроечных точек на угол φ_2 приводит к увеличению стойкости режущего инструмента, кроме этого исключается влияние изгибных деформаций державки резца на точность выполняемых размеров.

Полученная статистическая модель размерной стойкости может быть использована для расчета величины составляющей погрешности обработки, вызванной износом режущего инструмента при МТО, а также при автоматизированном синтезе оптимальной структуры операции, выполняемой на токарных станках с числовым программным управлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каштальян, И.А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания / И.А. Каштальян. – Минск: Изд-во БНТУ, 2008. – 311 с.
2. Официальный сайт компании Seco [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.secotools.com>.
3. Официальный сайт компании Iscar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iscar.com>.
4. Способ обработки канавки или проточки, или желоба на токарном станке с числовым программным управлением и резец для его осуществления: пат. Респ. Беларусь № 8943: МПК В 23В 1/00, 27/04 / И.А. Каштальян; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № а 20031179; заявл. 16.12.03; опубл. 28.02.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 1. – С. 64.
5. Соппротивление материалов: учеб. пособие для втузов / Н.А. Костенко [и др.]; под общ. ред. Н.А. Костенко. – М.: Высш. шк., 2004. – 430 с.
6. Каштальян, И.А. Многонаправленная токарная обработка на станках с ЧПУ / И.А. Каштальян // Изв. Тул. ГУ. Технические науки. Вып. 11: в 2 ч. Ч. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. – С. 244–254.
7. Гжиров, Р.И. Программирование обработки на станках с ЧПУ: справ. / Р.И. Гжиров, П.П. Серебrenицкий. – Л.: Машиностроение, 1990. – 588 с.
8. Пустыльник, Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
9. Медведев, Д.Д. Новый метод установления зависимостей для определения размерного износа режущих инструментов / Д.Д. Медведев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1968. – № 4. – С. 174–179.

Поступила 24.12.2015

RESISTANCE OF THE CUTTING TOOL IN THE MULTI-DIRECTIONAL TURNING COMPUTER NUMERIC CONTROL

I. KASHTALYAN, B. ORUKARI, L. DUBINA

The peculiarities of multi-directional turning cutting process on machines with computer numerical control are considered. The results of experiments on the resistance of cutting tool are carried out. Mathematical models, establishing the relationship between dimensional resistance of the cutting tool and the cutting conditions for multidirectional turning of the outer surface of rotation are presented.

Keywords: computer numeric control, multi-directional turning, cutting conditions, resistance of cutting tool.

УДК 621.941.01

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБА ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА НА ЕГО НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

*д-р техн. наук, доц. М.И. МИХАЙЛОВ**(Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого)*

Рассматривается влияние геометрических параметров зуба металлорежущего инструмента на его напряженное состояние. Приведено математическое моделирование напряженного состояния зуба инструмента численным моделированием. Установлено, что расположение пиковых значений напряжений в поверхностном слое передней поверхности зуба инструмента зависит от уровня нагрузок и геометрических размеров зуба инструмента.

Ключевые слова: зуб осевого инструмента, геометрические параметры, уровень нагрузок, напряженное состояние.

Введение. Как известно, зубья инструментов могут обрабатывать открытые, полузакрытые и закрытые поверхности [1]. Наибольшие нагрузки будут испытывать зубья инструмента, обрабатывающие торцовые канавки [2]. Исследованию напряженного состояния посвящено большое количество работ [2–18]. Изучение распределения напряжений в режущей части инструментов, в зоне непосредственного контакта стружки с передней поверхностью и заготовки с задней или за их пределами усложняется малыми размерами зоны контакта. Поэтому для определения напряжений в указанных областях исследователи применяли поляризационно-оптический метод [2–6], с помощью которого было найдено напряженное состояние в области контакта стружки с передней поверхностью. Изучением распределения напряжений в режущей части инструмента занимались многие ученые [2–18]. Еще в 30-х годах Э. Кокер и Л. Файлон положили начало исследованиям напряженного состояния режущего клина. Бетанели А.И. продолжил и развил метод Э. Кокера и Л. Файлона. В отличие от них, А.И. Бетанели рассматривал напряженное состояние клина за пределами зоны контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

Исследования напряженного состояния моделей позволили определить качественный характер распределения напряжений в режущей части резцов. Однако большая трудоемкость изготовления моделей и обработки полученных результатов не позволяет более широко использовать этот метод.

В последние годы для определения напряжений в режущем клине исследователи все шире используют математические методы, требующие применения вычислительной техники [15–18].

Методика и результаты расчетов. Для расчетов рабочую часть осесимметричного инструмента разделяли на ячейки (рис. 1). В качестве материала корпуса инструмента выбрана сталь 40Х, режущая пластина выполнена из твердого сплава Т15К6. Нагрузка на зубья по длине режущей кромки прикладывалась как равномерно-распределенная. В качестве переменных параметров приняли толщину пластины (b , мм), вылет зуба из корпуса (h , мм), передний γ и задний α углы.

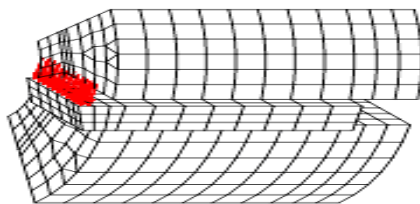


Рисунок 1 – Расчетная схема

В результате расчетов построены графики распределения внутренних эквивалентных напряжений по передней и задней поверхностям. При построении графиков, отражающих напряжения на передней поверхности, начало координат помещали в вершине режущей кромки, ось x направляли от центра вдоль режущей кромки, ось y – в направлении оси инструмента, а у графиков, отражающих распределение напряжений по задней поверхности, ось y направляли вдоль задней поверхности.

Как видно на рисунке 2, при увеличении толщины зуба b в 1,5 раза значения максимальных напряжений уменьшаются в 1,2 раза. При толщине зуба $b = 8$ мм в точках, расположенных вдоль режущей кромки на расстоянии 1,4 мм в направлении оси инструмента, график напряжений имеет выпуклую форму с вершиной в точке, находящейся на расстоянии 0,7 мм по оси x (рис. 2, а). При толщине $b = 12$ мм в аналогичных точках напряжения уменьшаются в 1,45 раза, и график имеет зону уплощения, а в точках, расположенных на расстоянии 2,8 мм в направлении оси инструмента, вид графика изменяется на криво-

линейный (рис. 2, б). В точках, расположенных на расстоянии 6,8 мм в направлении оси инструмента и вдоль режущей кромки, уровень напряжений падает в 1,17 раза, и вид графика не изменяется (см. рис. 2, а, б).

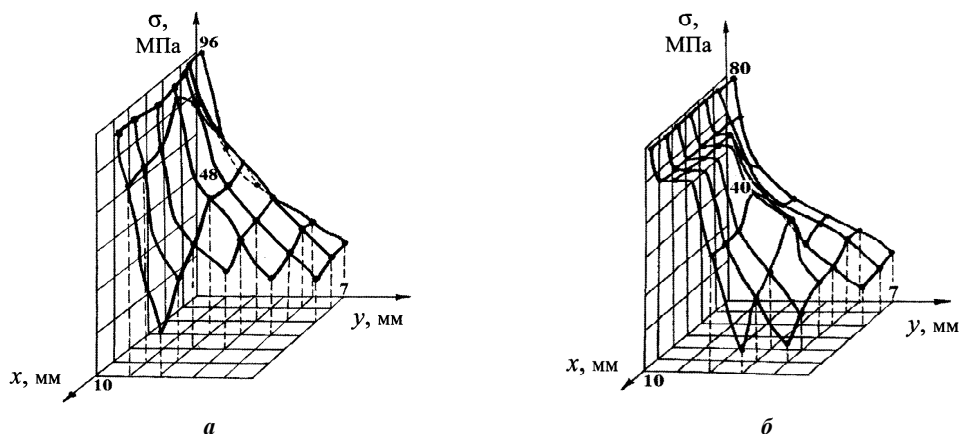


Рисунок 2 – Распределение эквивалентных напряжений по передней поверхности при толщине зуба $b = 8$ мм (а), $b = 12$ мм (б)

Увеличение толщины зуба в 1,5 раза приводит к уменьшению значений максимальных напряжений по задней поверхности в 1,2 раза, а в точках, расположенных на расстоянии 4,5 мм вдоль задней поверхности и вдоль режущей кромки, уровень напряжений падает в 1,17 раза, но вид графиков не изменяется (рис. 3, а, б).

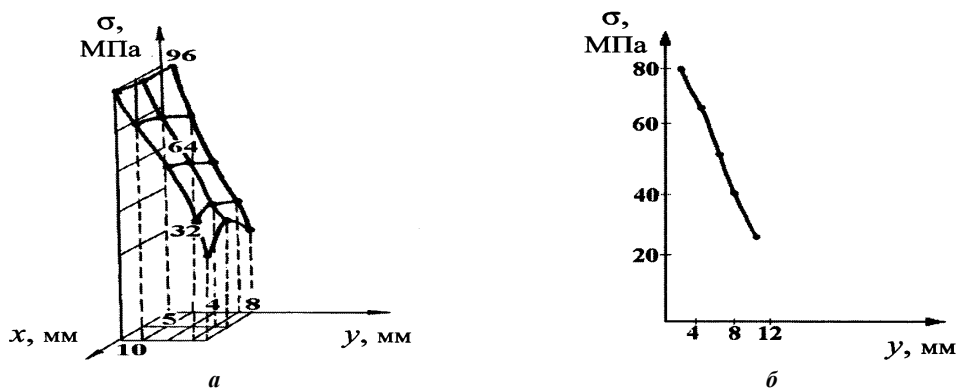


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений по задней поверхности при толщине зуба $b = 12$ мм (а), $b = 8$ мм (б)

С увеличением вылета зуба из корпуса (h) в 1,2 раза при удельной нагрузке $P = 60,7$ МПа значения максимальных напряжений увеличиваются в 1,35 раза (см. рис. 2, б, рис. 4, а).

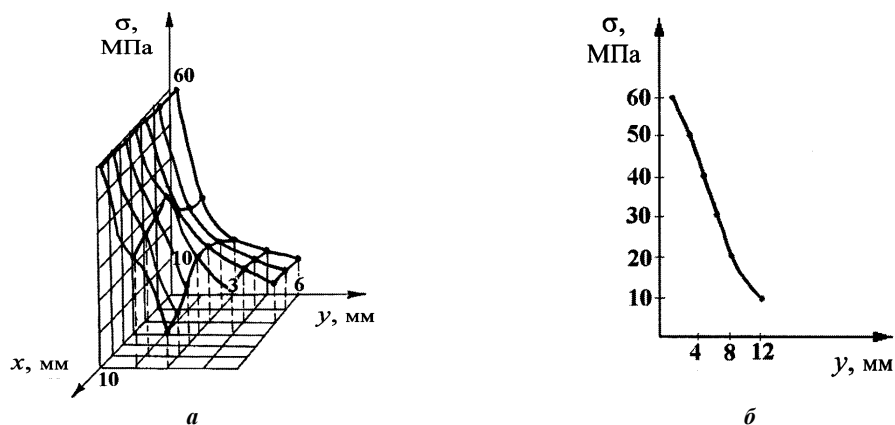


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений по передней поверхности (а); по задней поверхности (б) при вылете зуба из корпуса $h = 6$ мм

При величине вылета зуба из корпуса $h = 6$ мм в точках, расположенных на расстоянии 3 мм от вершины в направлении оси инструмента и вдоль режущей кромки, кривая распределения эквивалентных напряжений изменяется плавно (см. рис. 4, а). При значении вылета зуба из корпуса $h = 7$ мм уровень напряжений в точках с аналогичными координатами увеличивается в 1,3 раза, кривая имеет выпуклую форму (см. рис. 2, б). В точках, расположенных вдоль режущей кромки на расстоянии 6 мм по оси y , форма графиков не изменяется, а уровень напряжений увеличивается в 1,9 раза (см. рис. 2, б и 4, а). Значения максимальных напряжений по задней поверхности увеличиваются в 1,35 раза. В точках, расположенных на расстоянии 6 мм от вершины вдоль задней поверхности и вдоль режущей кромки, значения напряжения возрастают в 1,3 раза, а форма кривых не изменяется (см. рис. 3, б и 4, б).

Как видно на рисунке 5, при увеличении переднего угла γ в 1,5 раза максимальные напряжения увеличиваются в 1,04 раза. В точках, расположенных на расстоянии 1,6 мм от вершины в направлении оси инструмента и вдоль режущей кромки, уровень напряжений увеличивается в 1,03 раза, а вид графиков не изменяется. Уровень же максимальных напряжений по задней поверхности увеличивается в 1,04 раза, но вид кривых не изменяется по всей длине режущей кромки (рис. 6).

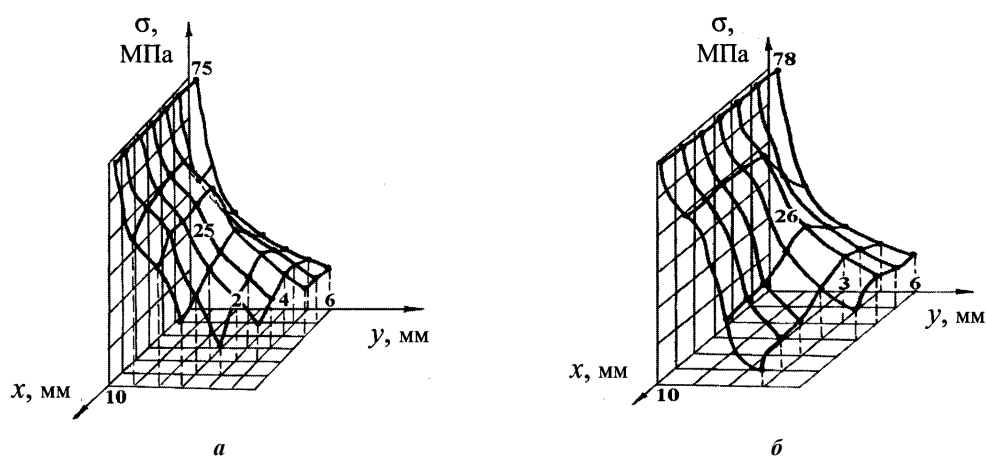


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений по передней поверхности при значении переднего угла: $\gamma = 10^\circ$ (а); $\gamma = 15^\circ$ (б)

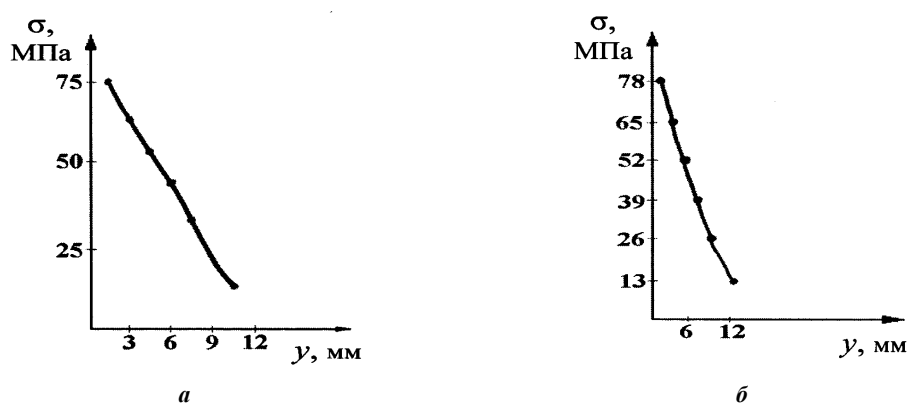


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений по задней поверхности при значении переднего угла $\gamma = 10^\circ$ (а), $\gamma = 15^\circ$ (б)

Как видно на рисунках 4, а и 5, б, при увеличении заднего угла α в 1,4 раза уровень максимальных напряжений увеличивается в 1,3 раза. В точках, расположенных на расстоянии 2 мм от вершины в направлении оси инструмента и вдоль режущей кромки, уровень напряжений растет в 1,2 раза, а вид графиков не изменяется. При этом напряжения в каждой точке вдоль режущей кромки по задней поверхности увеличиваются в 1,4 раза (см. рис. 2, а ($\alpha = 15^\circ$) и рисунок 5, б ($\alpha = 11^\circ$)).

При увеличении нагрузки в 1,7 раза значения максимальных напряжений возрастают в 1,25 раза. Как видно на рисунке 7, б, в точках, расположенных вдоль режущей кромки на расстоянии 2 мм вдоль оси инструмента, кривая распределения эквивалентных напряжений имеет выпуклую форму. При величине

нагрузки 60,7 МПа в точках с аналогичными координатами график имеет плавную выпукло-вогнутую форму. В точках, расположенных на расстоянии 6 мм в направлении оси инструмента и вдоль режущей кромки, уровень напряжений увеличивается в 1,9 раза, при этом вид графиков не изменяется (рис. 7).

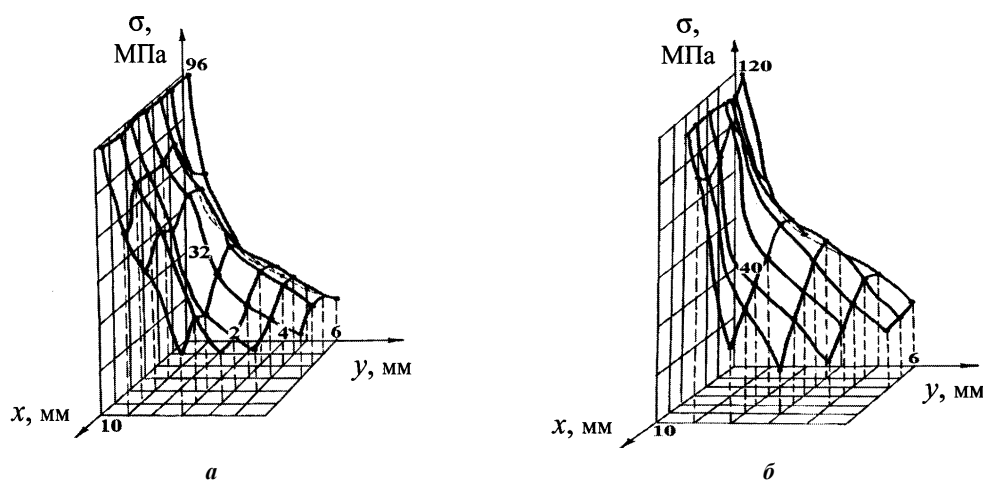


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений по передней поверхности при удельной нагрузке $P = 60,7$ МПа (а), $P = 101,3$ МПа (б)

С увеличением нагрузки в 1,7 раза уровень максимальных напряжений по задней поверхности возрастает в 1,25 раза. В точках, находящихся на расстоянии 4 мм от вершины вдоль задней поверхности и вдоль режущей кромки, значения напряжений возрастают в 1,3 раза, а характер графиков не изменяется (рис. 8).

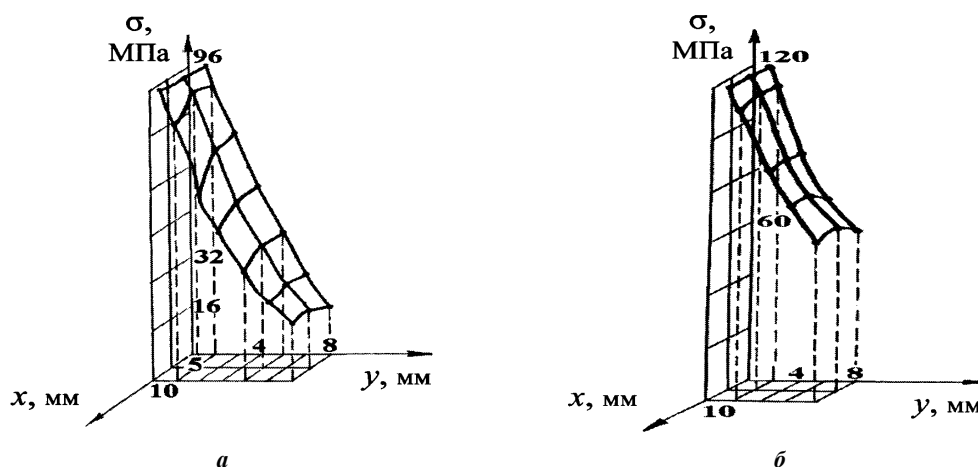


Рисунок 8 – Распределение эквивалентных напряжений по задней поверхности при нагрузке $P = 60,7$ МПа (а), $P = 101,3$ МПа (б)

Увеличение вылета зуба из корпуса (h) в 1,2 раза с нагрузкой $P = 101,3$ МПа влечет за собой увеличение в 1,2 раза уровня максимальных напряжений (рис. 9).

При величине вылета зуба из корпуса $h = 6$ мм в точках, расположенных на расстоянии 1,5 мм от вершины в направлении оси инструмента и вдоль режущей кромки, график распределения эквивалентных напряжений имеет выпукло-вогнутую форму (рис. 9, а). С увеличением вылета зуба до $h = 7$ мм кривая в аналогичных точках имеет более плавный вид, что связано с перераспределением напряжений, при этом численные значения напряжений увеличиваются в 1,18 раза (рис. 9, б). Для этих условий нагружения уровень максимальных напряжений по задней поверхности увеличивается в 1,2 раза и вид кривых не изменяется по всей длине режущей кромки (рис. 10).

Исходя из изложенного, видим, что расположение пиковых значений напряжений в поверхностном слое передней поверхности зуба инструмента зависит от уровня нагрузок и геометрических параметров зуба инструмента.

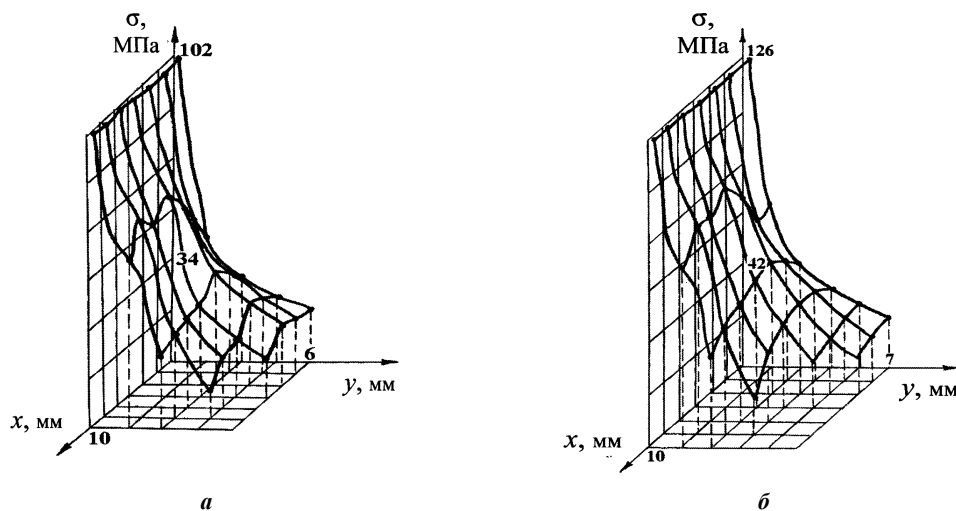


Рисунок 9 – Распределение эквивалентных напряжений по передней поверхности при вылете зуба $h = 6$ мм (а), $h = 7$ мм (б)

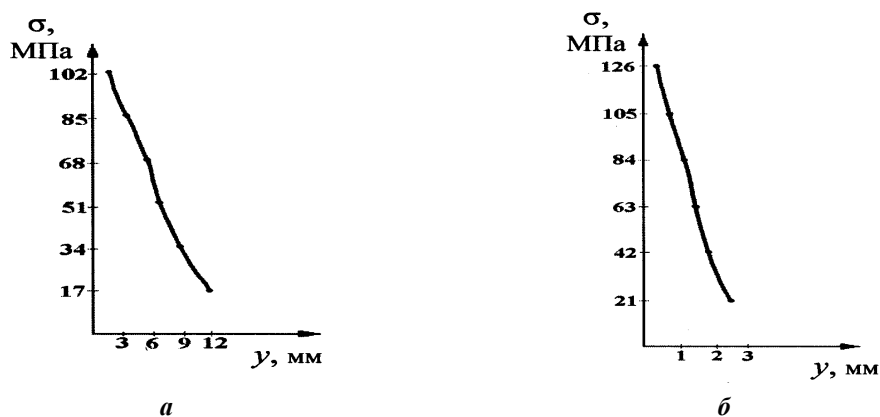


Рисунок 10 – Распределение эквивалентных напряжений по задней поверхности при вылете зуба $h = 6$ мм (а), $h = 7$ мм (б)

На основе проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

- при увеличении толщины зуба инструмента в 1,5 раза значения максимальных напряжений уменьшаются в 1,2 раза;
- при толщине зуба $b = 8$ мм в точках, расположенных вдоль режущей кромки на расстоянии 1,4 мм в направлении оси инструмента, график напряжений имеет выпуклую форму с вершиной в точке, находящейся на расстоянии 0,7 мм;
- при толщине зуба $b = 12$ мм в аналогичных точках напряжения уменьшаются в 1,45 раза, а в точках, расположенных на расстоянии 6,8 мм в направлении оси инструмента и вдоль режущей кромки, уровень напряжений падает в 1,17 раза;
- увеличение толщины зуба в 1,5 раза приводит к уменьшению значений максимальных напряжений по задней поверхности в 1,2 раза, а в точках, расположенных на расстоянии 4,5 мм вдоль задней поверхности и вдоль режущей кромки, уровень напряжений падает в 1,17 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов, М.И. Схематизация срезания припуска как способ создания прогрессивных видов обработки и инструмента / М.И. Михайлов // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: тез. докл. науч. конф., Новополоцк, 1995 г.; ПГУ. – Новополоцк, 1995. – С. 29.
2. Михайлов, М.И. Повышение прочности сборного режущего инструмента / М.И. Михайлов. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 174 с.

3. Андреев, Г.С. Напряженное состояние режущей части резца при периодическом резании / Г.С. Андреев // Прочность режущего инструмента: сб. ст. – М., 1969. – С. 12–14.
4. Бетанели, А.И. Приспособление для поляризационно-оптического исследования напряжений в режущей части инструмента в процессе резания / А.И. Бетанели // Тр. Груз. политехн. ин-та. – Тбилиси, 1965. – № 3. – С. 16–21.
5. Primus, J.F. Spezifische Beanspruchungen in den Kontakt sonen von Drehwerkseenden und ihr Einfluss auf Spanbildung / J.F. Primus. – Berlin, 1970. – 168 s.
6. Кокер, Э. Оптический метод исследования напряжений / Э. Кокер, Л. Файлон. – Москва; Ленинград: ОНТИ, 1936. – 248 с.
7. Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. Хае [и др.]; под общ. ред. Г.Л. Хае. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
8. Бетанели, А.И. Хрупкая прочность режущей части инструмента / А.И. Бетанели. – Тбилиси: ГПИ, 1969. – 248 с.
9. Рылин, А.В. Анализ напряженного состояния лезвия инструмента / А.В. Рылин, В.А. Сениюков, А.В. Серов // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. – 1985. – № 7. – С. 117–120.
10. Утешев, М.Х. Некоторые результаты исследования напряженного состояния режущей части инструмента при помощи лазера / М.Х. Утешев, В.А. Сениюков // Прочность режущего инструмента. – 1969. – С. 51–53.
11. Primus, J.F. Ermittlung der Spannungsverteilung auf der Spanfläche von Drehwerkzeugen bei der Stahlzerspannung / J.F. Primus // Industrie Anzeiger. – 1971. – № 6. – S. 140–146.
12. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
13. Остафьев, В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В.А. Остафьев. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.
14. Миранцов, Л.М. Исследование напряженно-деформированного состояния механически закрепленной режущей пластины резцов для тяжелых токарных станков МКЭ / Л.М. Миранцов, В.С. Гузенко, В.А. Овчаренко // Надежность режущего инструмента: материалы 3-го всесоюз. науч.-техн. семинара, Донецк, 1984 г. / Донец. политехн. ин-т. – Донецк, 1984. – С. 103–105.
15. Фельдштейн, Е.Э. Прогнозирование работоспособности сменных многогранных пластин режущих инструментов / Е.Э. Фельдштейн // СТИН. – 1998. – № 10. – С. 14–19.
16. Трусов, В.В. Повышение работоспособности режущего инструмента конструкционными методами / В.В. Трусов, В.А. Козлов // Инструмент. – 1998. – № 12. – С. 30.
17. Малыгин, В.И. Модель напряженно-деформированного состояния режущего элемента сборного инструмента / В.И. Малыгин, Н.В. Лобанов // Вестн. машиностроения. – 2000. – № 2. – С. 22–26.
18. Гречишников, В.А. Исследование деформированного состояния сборного режущего элемента методом конечных элементов / В.А. Гречишников, С.В. Лукина, А.И. Веселов // Конструкторско-технологическая информатика 2000: материалы IV Междунар. конгр., Москва, 2000 г. / МГТУ. – М., 2000. – Т. 1. – С. 158–160.

Поступила 29.01.2016

INFLUENCE OF GEOMETRICAL OF PARAMETERS OF AXIAL TOOL TOOTH AT ITS STRESS STATE

M. MIKHAILOV

The influence of the geometric parameters of the tooth cutting tools on its stress state. The mathematical modeling of the stress state of tooth numerical simulation tools. It has been established that the location of the peak values stresses in a superficial layer of the front surface of tooth tool depends on the loadings and geometry tooth of the tool.

Keywords: tooth of axial tool, contact sone, level load, tension, mathematical model.

УДК 621.91.01/02

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ НА ВЫБОР СКОРОСТИ ПОДАЧИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК;
И.П. КУНЦЕВИЧ; Р.С. ХМЕЛЬНИЦКИЙ; В.С. АНИСИМОВ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается влияния шероховатости сферической поверхности детали на выбор скорости подачи вращающегося режущего инструмента. Сформулированы задачи исследования. Выполнено математическое моделирование изучаемого процесса. Приведены формулы для расчета установочных параметров инструмента и заготовки, а также скорости подачи инструмента в связи с шероховатостью обработанной сферической поверхности детали. Проанализированы результаты обработки образцов деталей при заданных значениях шероховатости и соответствующей подаче.

Ключевые слова: сферическая поверхность, обработка сферической поверхности, шероховатость, математическая модель, зависимость подачи от шероховатости поверхности.

Введение. В настоящее время широкое применение находят детали со сферическими поверхностями, например, в шаровых опорах автомобилей, шаровых кранах запорной арматуры, подпятниках погружных насосов, рукоятках переключения, декоративных изделиях и т.п. В зависимости от типоразмеров и количества этих деталей, требований точности используются различные методы обработки их сферических поверхностей: давлением – холодная высадка из трубной заготовки, штамповка с последующей сваркой, поперечно-клиноватая прокатка; литьем; механической обработкой [1–3]. Применяемые способы механической обработки сферических поверхностей также разнообразны: фасонное точение, резание по копиру, обработка на станках с числовым программным управлением, внутреннее и охватывающее фрезерование и т.п. [4]. Одним из перспективных способов механической обработки является фрезерование внутренней или наружной сферической поверхности специальным инструментом на высокой скорости резания, обеспечивающим качество и точность, сопоставимую со шлифованием и исключающим недостатки последнего, связанные, например, с шаржированием обработанной поверхности зёрнами абразива, прижогами и т.д.

В связи с применением высоких скоростей резания требуется более детальный анализ кинематических и геометрических параметров охватывающего и внутреннего фрезерования как в статике, так и в динамике, поскольку эти параметры оказывают существенное влияние на производительность, точность и качество обработки.

Установочные параметры инструмента и заготовки. Схема охватывающего фрезерования сферической поверхности детали представлена на рисунке 1. По этой схеме режущий инструмент 1 совершает главное вращательное движение D_r , а заготовка 2 диаметром $D_{сф}$ – вращательное движение подачи D_s .

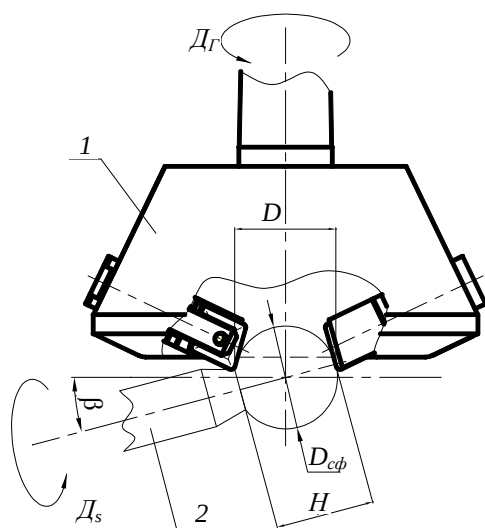


Рисунок 1 – Охватывающее фрезерование сферической поверхности детали

При этом режущие лезвия инструмента настраиваются на диаметр D , а заготовка 2 устанавливается относительно инструмента под углом к оси вращения β . Причем оси вращения заготовки и инструмента пересекаются в одной точке. Схема установки обеспечивает получение неполной сферической поверхности высотой H .

Процесс обработки сферической поверхности можно описать функцией, которая включает размеры заготовки и инструмента с закругленной вершиной лезвия, установочные параметры инструмента и заготовки, шероховатость поверхности как одну из основных характеристик качества обрабатываемой поверхности, частоты вращения заготовки и инструмента, то есть

$$F_i = f(D_{сф}, H, \beta, Rz, r, n_1, n_2, \tau), \quad (1)$$

где $D_{сф}$ – диаметр сферической поверхности детали, мм; H – высота сферической поверхности, мм; β – угол установки заготовки относительно инструмента, град; r – радиус закругления вершины лезвия, мм; Rz – шероховатость сферической поверхности, мкм; n_1 и n_2 – соответственно частота вращения инструмента и заготовки, мин⁻¹; τ – время, с.

На определенном этапе анализа параметры $D_{сф}, H, Rz, r, n_1$ будут считаться заданными, то есть постоянными величинами, время τ – переменная величина.

Рассмотрим проекцию заготовки на плоскость (рис. 2), если она расположена под некоторым углом к горизонтальной оси. Пусть β – угол наклона заготовки; L_1 – ось вращения заготовки; L_2 – горизонтальная ось; $AA_1 = D_{cf}$ – диаметр сферы; $AK = H$ – высота сферической поверхности.

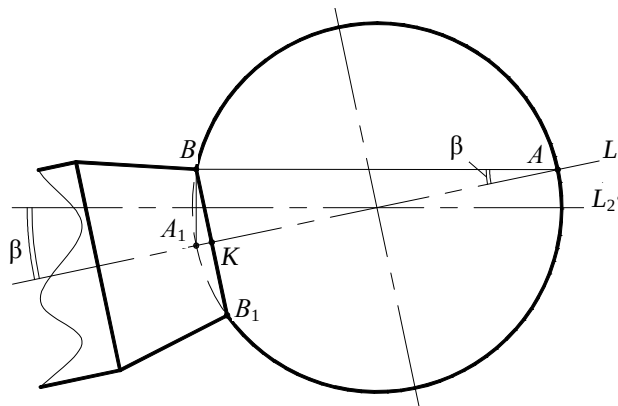


Рисунок 2 – Проекция заготовки на плоскость

Установим зависимость угла наклона заготовки (β) от диаметра сферической поверхности (D_{cf}) и высоты сферической поверхности (H).

1. Треугольник A_1BA – прямоугольный, так как опирается на диаметр окружности ($\angle A_1BA = 90^\circ$); $BK \perp AA_1$, следовательно, $BK^2 = A_1K \cdot KA$, где $KA = H$, $A_1K = A_1A - AK = D_{cf} - H$.

Тогда $BK^2 = H \cdot (D_{cf} - H)$.

2. Треугольник BKA – прямоугольный, следовательно, $BK^2 = BA^2 - KA^2$, или $BK^2 = BA^2 - H^2$.

3. Далее, $BA^2 - H^2 = H \cdot (D_{cf} - H)$, $BA^2 = H \cdot D_{cf} - H^2 + H^2$, $BA^2 = H \cdot D_{cf}$.

Значит, $BA = \sqrt{H \cdot D_{cf}}$.

4. Из треугольника BKA следует, что $\cos \beta = \frac{KA}{BA} = \frac{H}{\sqrt{H \cdot D_{cf}}} = \sqrt{\frac{H}{D_{cf}}}$.

Тогда

$$\beta = \arccos \left(\sqrt{\frac{H}{D_{cf}}} \right). \quad (2)$$

Итак, угол наклона заготовки β к горизонтальной оси находится по формуле (2). В зависимости от условий обработки сферической поверхности угол β будет принимать значение $0 \leq \beta \leq \arccos \left(\sqrt{\frac{H}{D_{cf}}} \right)$.

Скорость подачи инструмента и её связь с шероховатостью обработанной поверхности. Как известно, шероховатость – одна из характеристик качества обработанной поверхности. Подача инструмента выбирается исходя из заданной шероховатости.

Рассмотрим случай, когда сферическая поверхность обрабатывается резцом с закругленной вершиной лезвия. Установим зависимость подачи S_o инструмента от заданной шероховатости Rz и радиуса вершины лезвия инструмента r .

Если обрабатывается плоская поверхность, подача S_o инструмента находится по формуле [5]:

$$S_o \approx \sqrt{8rRz}. \quad (3)$$

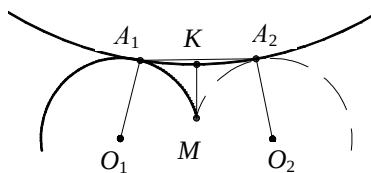


Рисунок 3 – Проекция инструмента и заготовки на плоскость

Установим зависимость $S_o = f(r, Rz)$ для сферических поверхностей. Пусть точка A_1 – точка касания вершины инструмента в начальном положении (рис. 3), а точка A_2 – точка касания вершины инструмента при передвижении инструмента на дуге $A_1A_2 = S_o$. Пусть O_1 и O_2 – центры вершины лезвия инструмента соответственно в начальном положении и при перемещении на S_o . Тогда $O_1A_1 = O_2A_2 = r$ (r – радиус вершины инструмента).

Пусть пересечение окружностей вершины инструмента есть точка M .

Перпендикуляр, опущенный из точки M на дугу A_1A_2 , есть отрезок MK . Причем $MK = Rz$ – шероховатость поверхности (высота микронеровностей).

Поскольку O_1A_1 и O_2A_2 проходят перпендикулярно к касательным в точки A_1 и A_2 к окружности, то O_1A_1 не параллельно O_2A_2 . В данном случае дуга A_1A_2 приблизительно равна отрезку A_1A_2 , то есть дугу можно заменить отрезком, а $MK = Rz$ можно считать перпендикуляром, опущенным на отрезок A_1A_2 .

Таким образом, задачу можно свести к решению геометрической задачи (рис. 4).

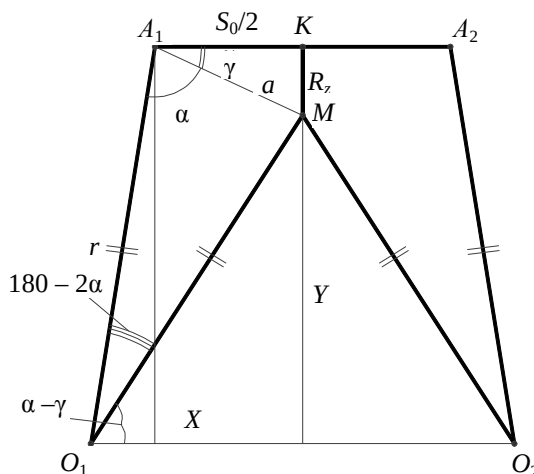


Рисунок 4 – Схема к геометрической задаче

Дано:

$O_1A_1 = O_1M = O_2M = O_2A_2 = r$, r – радиус вершины инструмента;

$MK = Rz$ – шероховатость поверхности.

Найти:

$A_1A_2 = S_o$ – подача инструмента.

Решение

Докажем, что рассматриваемая фигура $O_1A_1A_2O_2$ (см. рис. 4) является равнобедренной трапецией.

$KM \in KH$ – высота трапеции, причем точка K принадлежит середине A_1A_2 .

Для упрощения решения принимаем, что $A_1K = \frac{S_o}{2}$, то есть половине подачи инструмента.

Чтобы решить задачу, введем вспомогательные углы. Пусть $\angle MA_1K = \gamma$, а $\angle O_1A_1M = \alpha$. Кроме того, введем дополнительные переменные $A_1M = a$, $O_1H = X$, $HM = Y$.

Далее, из прямоугольного треугольника A_1KM имеем $\angle A_1MK = 90^\circ - \gamma$; из равнобедренного треугольника O_1A_1M – $\angle A_1MO_1 = \alpha$, следовательно, $\angle A_1O_1M = 180^\circ - 2\alpha$;

$$\angle MO_1H = 180^\circ - (\angle KA_1M + \angle MA_1O_1) - \angle A_1O_1M = 180^\circ - \gamma - \alpha - 180^\circ + 2\alpha = \alpha - \gamma.$$

Теперь установим ряд зависимостей между данными и вспомогательными величинами.

1. Из треугольника прямоугольного A_1KM имеем

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{Rz}{\frac{S_o}{2}} = \frac{2Rz}{S_o} \quad \text{или} \quad \sin \gamma = \frac{Rz}{a} = \frac{Rz}{\sqrt{\frac{S_o^2}{4} + Rz^2}} = \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}, \quad \text{или} \quad \cos \gamma = \frac{\frac{S_o}{2}}{a} = \frac{S_o}{2\sqrt{\frac{S_o^2}{4} + Rz^2}} = \frac{S_o}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}.$$

Воспользуемся одной из записей тригонометрических функций угла γ :

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2Rz}{S_o}, \quad \sin \gamma = \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}, \quad \cos \gamma = \frac{S_o}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}.$$

2. Из равнобедренного треугольника A_1O_1M по теореме косинусов получаем:

$$a^2 = r^2 + r^2 - 2r^2 \cos(180^\circ - 2\alpha),$$

$$a^2 = 2r^2 + 2r^2 \cos 2\alpha,$$

$$a^2 = 2r^2(1 + \cos 2\alpha),$$

$$a^2 = 2r^2(1 + 2\cos^2 \alpha - 1),$$

$$a^2 = 4r^2 \cos^2 \alpha \Rightarrow a = \pm 2r \cos \alpha,$$

$$\alpha - \text{острый угол} \Rightarrow a = 2r \cos \alpha \Rightarrow \cos \alpha = \frac{a}{2r},$$

или

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{\frac{S_o^2}{4} + Rz^2}}{2r} = \frac{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}{4r}.$$

Итак

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}{4r}. \quad (4)$$

3. Из прямоугольного треугольника O_1MH получаем:

$$X^2 + Y^2 = r^2, \quad (5)$$

$$X = r \cos(\alpha - \gamma), \quad (6)$$

$$Y = r \sin(\alpha - \gamma). \quad (7)$$

4. Из прямоугольного треугольника $O_1H_1A_1$ имеем:

$$\left(X - \frac{S_o}{2}\right)^2 + (Rz + Y)^2 = r^2,$$

$$X - \frac{S_o}{2} = r \cos(180^\circ - (\alpha + \gamma)), \quad (8)$$

$$X - \frac{S_o}{2} = -r \cos(\alpha + \gamma) \Rightarrow -X + \frac{S_o}{2} = r \cos(\alpha + \gamma),$$

$$Rz + Y = r \sin(180^\circ - (\alpha + \gamma)) \Rightarrow Rz + Y = r \sin(\alpha + \gamma).$$

Далее возьмем за основу равенство (8) и преобразуем его:

$$\left(X - \frac{S_o}{2}\right)^2 + (Rz + Y)^2 = r^2,$$

$$X^2 - 2X \frac{S_o}{2} + \frac{S_o^2}{4} + Rz^2 + 2RzY + Y^2 = r^2.$$

Подставляя формулу (5), имеем:

$$r^2 - XS_o + \frac{S_o^2}{4} + Rz^2 + 2RzY = r^2,$$

$$\frac{S_o^2}{4} - XS_o + Rz^2 + 2RzY = 0.$$

Заменяем X и Y выражениями (6) и (7) и получаем следующую формулу:

$$\frac{S_o^2}{4} - S_o r \cos(\alpha - \gamma) + Rz^2 + 2Rz \cdot r \sin(\alpha - \gamma) = 0. \quad (9)$$

Воспользуемся тригонометрическими формулами и преобразуем $\cos(\alpha - \gamma)$ и $\sin(\alpha - \gamma)$:

$$\begin{aligned}\cos(\alpha - \gamma) &= \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma = \frac{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}{4r} \cdot \frac{S_o}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} + \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} \cdot \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} = \\ &= \frac{S_o}{4r} + \sqrt{1 - \frac{S_o^2 + 4Rz^2}{16r^2}} \cdot \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} = \frac{S_o}{4r} + \frac{\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{4r} \cdot \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} = \frac{S_o}{4r} + \frac{Rz\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{2r\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sin(\alpha - \gamma) &= \sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma = \frac{\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{4r} \cdot \frac{S_o}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} - \frac{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}{4r} \cdot \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} = \\ &= \frac{S_o\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{4r\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} - \frac{Rz}{2r}.\end{aligned}$$

Тогда
$$\frac{S_o^2}{4} - S_o r \left(\frac{S_o}{4r} + \frac{Rz\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{2r\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} \right) + Rz^2 + 2Rzr \left(\frac{S_o\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{4r\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} - \frac{Rz}{2r} \right) = 0,$$

или
$$\frac{S_o^2}{4} - \frac{S_o^2}{4} - \frac{RzS_o\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{2\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} + Rz^2 + \frac{RzS_o\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{2\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} - Rz^2 = 0,$$

или $0 = 0$.

Таким образом, можно сделать вывод, что все полученные формулы взаимосвязаны, и это обстоятельство не позволяет установить зависимость подачи инструмента S_o от радиуса вершины инструмента r и шероховатости поверхности Rz . Кроме величин радиуса вершины r инструмента, шероховатости поверхности Rz добавим радиус сферы $R_{сф}$ заготовки. Тогда задача примет следующую формулировку:

установить зависимость подачи S_o инструмента от заданной шероховатости поверхности Rz , радиуса вершины инструмента r и радиуса сферической поверхности $R_{сф}$ ($D_{сф}$ – диаметр сферической поверхности), то есть $S_o = f(Rz, r, R_{сф})$.

Примем, что инструмент устанавливается перпендикулярно сферической поверхности заготовки, то есть радиус при вершине лезвия инструмента и радиус сферы заготовки лежат на одной прямой.

Воспользуемся рисунком 3. Добавив некоторые данные, получим рисунок 5.

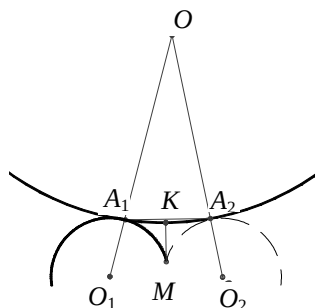


Рисунок 5 – Проекция инструмента и заготовки на плоскость

Пусть $O_1A_1 = O_2A_2 = r$, где r – радиус вершины инструмента, $MK = Rz$ – шероховатость обработанной поверхности, A_1A_2 – подача инструмента, $OA_1 = OA_2 = R_{сф}$ – радиус сферической поверхности.

Таким образом, сформулированная задача сводится к решению следующей геометрической задачи, проиллюстрированной рисунком 6.

Дано:

$O_1A_1 = O_1M = O_2M = O_2A_2 = r$ – радиус вершины инструмента;

$MK = Rz$ – шероховатость поверхности;

$OA_1 = OA_2 = R_{сф} = \frac{D_{сф}}{2}$ – радиус сферической поверхности.

Найти:

$A_1A_2 = S_o$ – подача инструмента.

Решение:

Введем вспомогательные углы.

Пусть $\angle O_1A_1M = \alpha$, $\angle MA_1K = \gamma$.

Тогда $\angle OA_1K = 180^\circ - (\alpha + \gamma)$.

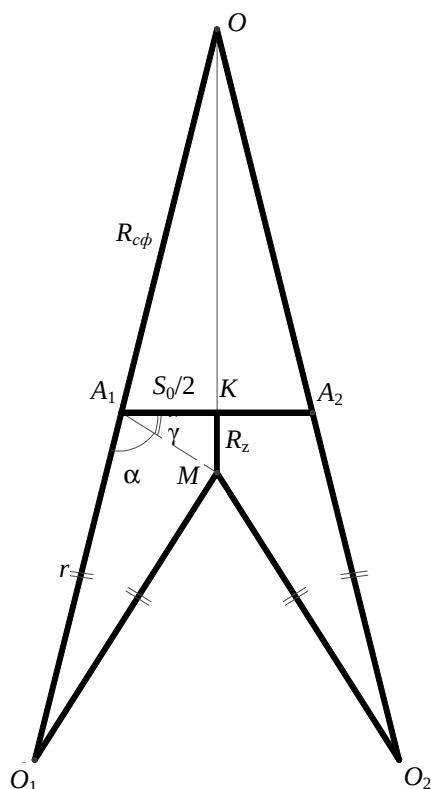


Рисунок 6 – Схема к геометрической задаче

Установим ряд зависимостей между данными и вспомогательными величинами.

1. Из прямоугольного треугольника A_1KM

$$A_1 M = \sqrt{\frac{S_o^2}{4} + Rz^2} = \frac{1}{2} \sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}; \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{2Rz}{S_o};$$

$$\sin \gamma = \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}; \quad \cos \gamma = \frac{S_o}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}.$$

2. Из равнобедренного треугольника A_1O_1M по теореме косинусов получаем

$$A_1 M = 2r \cos \alpha \Rightarrow \cos \alpha = \frac{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}{4r} \quad (\text{см. решение выше}).$$

3. Из прямоугольного треугольника OA_1K имеем:

$$\cos(180^\circ - (\alpha + \gamma)) = \frac{\frac{S_o}{2}}{R_{cd}}$$

или
$$-\cos(\alpha + \gamma) = \frac{S_o}{2R_{cd}},$$

$$\sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma = \frac{S_o}{2R_{c\dot{b}}}$$

Далее, скомпонуем полученные зависимости:

$$\sin \gamma = \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}; \quad (10)$$

$$\cos \gamma = \frac{S_o}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}; \quad (11)$$

$$\cos \alpha = \frac{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}{4r}. \quad (12)$$

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha} = \sqrt{1 - \frac{S_o^2 + 4Rz^2}{16r^2}} = \frac{\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{4r}, \quad (13)$$

где α – острый угол;

$$-\cos(\alpha + \gamma) = \frac{S_o}{2R_{ch}}. \quad (14)$$

В формулу (14) подставляем (10), (11), (12), (13):

$$\sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma = \frac{S_o}{2R_{c\phi}},$$

$$\frac{S_o}{2R_{c\phi}} = \frac{\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{4r} \cdot \frac{2Rz}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} - \frac{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}{4r} \cdot \frac{S_o}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}},$$

или
$$\frac{S_o}{2R_{cf}} = \frac{Rz\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{2r\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} - \frac{S_o}{4r},$$

или
$$\frac{S_o}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_{cf}} + \frac{1}{2r} \right) = \frac{Rz\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{2r\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} \quad | \cdot 2,$$

или
$$S_o \cdot \frac{2r + R_{cf}}{R_{cf} \cdot 2r} = \frac{Rz\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{r\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}} \quad | \cdot r,$$

или
$$\frac{S_o(2r + R_{cf})}{2R_{cf} \cdot Rz} = \frac{\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}.$$

Упростим выполненные преобразования.

Пусть $\frac{2r + R_{cf}}{2 \cdot R_{cf} \cdot Rz} = a$, тогда

$$S_o a = \frac{\sqrt{16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2}}{\sqrt{S_o^2 + 4Rz^2}}, \quad (15)$$

$$S_o^2 a^2 (S_o^2 + 4Rz^2) = 16r^2 - S_o^2 - 4Rz^2,$$

$$S_o^4 a^2 + 4Rz^2 S_o^2 a^2 + S_o^2 + 4Rz^2 - 16r^2 = 0,$$

$$S_o^4 a^2 + S_o^2 (4Rz^2 a^2 + 1) + 4Rz^2 - 16r^2 = 0.$$

Решим биквадратное уравнение:

$$\begin{aligned} D &= (4Rz^2 a^2 + 1)^2 - 4(4Rz^2 + 16r^2) \cdot a^2 = 16Rz^4 a^4 + 8Rz^2 a^2 + 1 - 16Rz^2 a^2 + 64r^2 a^2 = \\ &= 16Rz^4 a^4 - 8Rz^2 a^2 + 1 + 64r^2 a^2 = (4Rz^2 a^2 - 1)^2 + 64r^2 a^2; \end{aligned}$$

$$S_o^2 = \frac{-(4Rz^2 a^2 + 1) \pm \sqrt{(4Rz^2 a^2 - 1)^2 + 64r^2 a^2}}{2a^2}.$$

Так как $S_o > 0$, то

$$S_o = \sqrt{\frac{-4Rz^2 a^2 - 1 + \sqrt{(4Rz^2 a^2 - 1)^2 + 64r^2 a^2}}{2a^2}}, \quad (16)$$

где $a = \frac{2r + R_{cf}}{2 \cdot R_{cf} \cdot Rz} = \frac{4r + D_{cf}}{2D_{cf} \cdot Rz}.$

Полученная для расчета подачи формула получилась громоздкой, что усложняет его и требует упрощения формулы (16). Для этого вернемся к формуле (15) и исключим из нее слагаемое Rz^2 , так как при возведении в квадрат значение данного слагаемого будет стремиться к нулю. Тогда получим:

$$S_o a = \frac{\sqrt{16r^2 - S_o^2}}{S_o},$$

или
$$S_o^2 a = \sqrt{16r^2 - S_o^2},$$

$$S_o^4 a^2 = 16r^2 - S_o^2,$$

$$S_o^4 a^2 + S_o^2 - 16r^2 = 0.$$

Решив биквадратное уравнение, получим

$$S_o^2 = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 64r^2 a^2}}{2a^2}.$$

Так как $S_o > 0$, то $S_o^2 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 64r^2 a^2}}{2a^2}$.

Итак
$$S_o = \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1 + 64r^2 a^2}}{2a^2}}, \quad (17)$$

где $a = \frac{2r + R_{cf}}{2 \cdot R_{cf} \cdot Rz} = \frac{4r + D_{cf}}{2D_{cf} \cdot Rz}$.

Оценим размерности полученных величин:

$$[a] = \frac{\text{мм} + \text{мм}}{\text{мм} \cdot \text{мм}} = \frac{\text{мм}}{\text{мм}^2} = \frac{1}{\text{мм}};$$

$$[S_o] = \sqrt{\frac{[1] + \sqrt{[1] + \text{мм}^2 \cdot \frac{1}{\text{мм}^2}}}{\frac{1}{\text{мм}^2}}} = \sqrt{\frac{[1]}{\frac{1}{\text{мм}^2}}} = \sqrt{\text{мм}^2} = \text{мм}.$$

Проведем сравнение значений подачи при обработке сферической поверхности радиусом $R_{cf} = 18$ мм и шероховатостью $Rz = 0,010$ мм инструментом с радиусом при вершине резца $r = 0,8$ мм, рассчитанных по точной и упрощенной формулам:

- по точной

$$S_o = \sqrt{\frac{-4Rz^2 a^2 - 1 + \sqrt{(4Rz^2 a^2 - 1)^2 + 64r^2 a^2}}{2a^2}} = 0,24168 \text{ мм/об};$$

- по упрощенной

$$S_o = \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1 + 64r^2 a^2}}{2a^2}} = 0,24209 \text{ мм/об}.$$

Погрешность расчета по этим формулам составляет:

$$\delta = \frac{|0,24168 - 0,24209|}{0,24168} \cdot 100\% = 0,17\%.$$

Учитывая малую погрешность, для расчета можно использовать как точную формулу, так и упрощенную.

Сравним погрешность при расчете подачи по общепринятой формуле (3) с упрощенной формулой:

$$S_o \approx \sqrt{8rRz} = 0,25298 \text{ мм/об}.$$

$$\delta = \frac{|0,24209 - 0,25298|}{0,24209} \cdot 100\% = 4,498\%.$$

Если радиус сферической поверхности будет большим (например, $R_{cf} = 100$ мм), подача составит

$$S_o = \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1 + 64r^2 a^2}}{2a^2}} = 0,2506 \text{ мм/об}. \text{ Тогда погрешность } \delta = \frac{|0,2506 - 0,25298|}{0,2506} \cdot 100\% = 0,95\%.$$

Отсюда можно сделать вывод, что полученные формулы (16) и (17) для расчета скорости подачи инструмента имеют существенное значение при обработке сферических поверхностей небольшого диаметра (до 100 мм). При больших диаметрах обрабатываемых сфер (более 100 мм) погрешность расчета

подачи по общепринятым и полученным формулам находится в пределах 1%, значит, расчет можно производить по любой из них.

Анализ расчета по полученной формуле при обработке сферической поверхности $R_{сф} = 18$ мм с шероховатостью, изменяющейся в диапазонах $Rz = 0,001...0,1$ мм, инструментом с радиусом при вершине лезвия, изменяющимся в диапазоне $r = 0,2...25,4$ мм, представлен в виде графиков на рисунках 7 и 8.

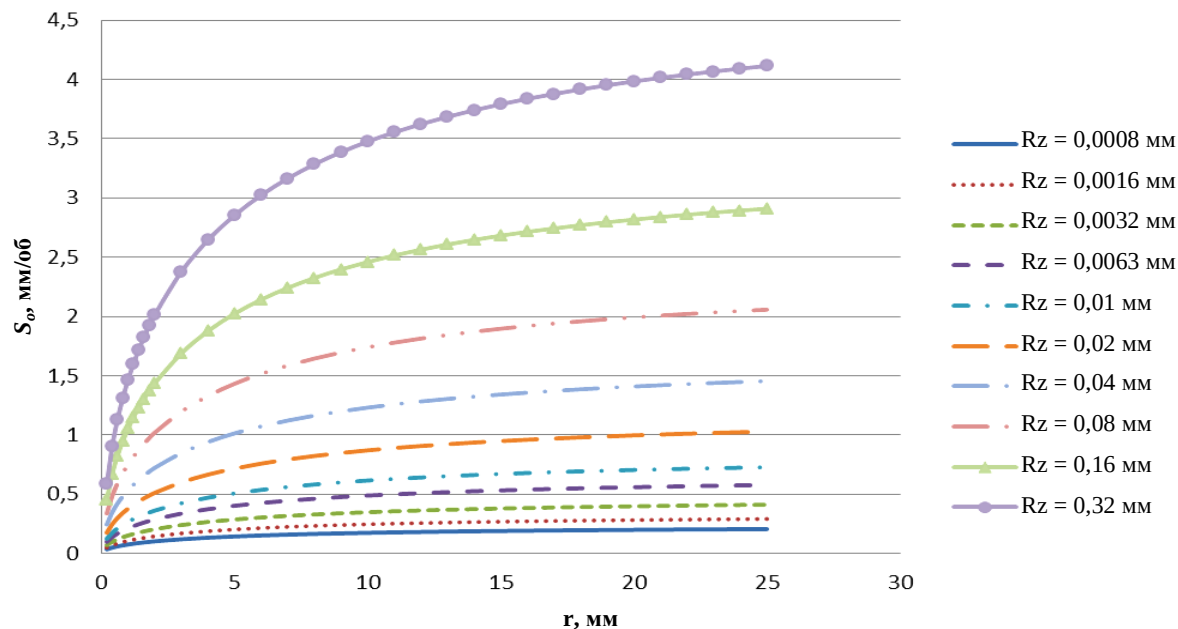


Рисунок 7 – Зависимость подачи от радиуса при вершине лезвия при различных значениях шероховатости поверхности

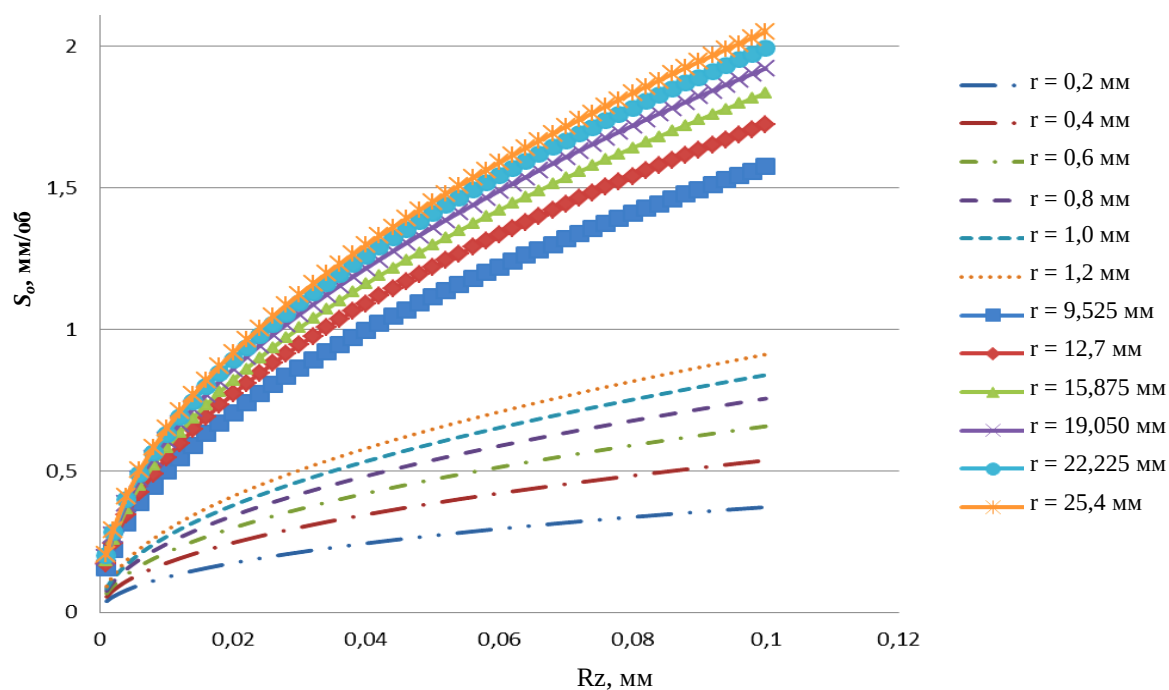


Рисунок 8 – Зависимость подачи от шероховатости поверхности с различными радиусами при вершине лезвия инструмента

Графики, представленные на рисунках 1 и 2, как и формулы (16), (17), позволяют определить значение подачи $S_{об}$, обеспечивающей заданное значение шероховатости обработанной поверхности. Видно,

что с увеличением шероховатости поверхности возрастает значение подачи, причем тем больше, чем больше значение радиуса при вершине (r). При малых значениях Rz и r значение подачи растет интенсивнее, чем при больших. Радиус сферической поверхности детали R_{cf} не оказывает существенного влияния на выбор подачи S_o , и его изменением можно пренебречь.

Заключение. Результаты обработки образцов деталей при заданных значениях шероховатости, соответствующей подаче, и результаты измерений шероховатости полученных поверхностей образцов показали, что отклонение измеренных от заданных значений параметров Rz находится в пределах 10...15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аналитическое решение задачи о формообразовании шаровых пробок путем обжима трубных заготовок в полусферических матрицах / М.М. Тверской [и др.] // Вестн. ЮУрГУ: Серия «Машиностроение», 2014. – Т. 14, № 2. – С. 39–50.
2. Кожевникова, Г.В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Белорус. наука, 2010. – 291 с.
3. Способ изготовления сферической заготовки пробки шарового крана: пат. 2393047 (RU) МПК B22C9/00 / В.П. Анисимов, А.А. Цыбулаев. – № 2008135944/02; заявл. 08.09.2008; опубл. 20.03.2010.
4. Анализ способов обработки сферических поверхностей / Н.Н. Попок [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та: Сер. В. Прикладные науки. Промышленность. – 2006. – № 12. – С. 42–45.
5. Попок, Н.Н. Теория резания: учеб. пособие для студентов машиностр. специальностей / Н.Н. Попок. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – 228 с.

Поступила 02.02.2016

MODELLING OF INFLUENCE OF ROUGHNESS OF THE SPHERICAL SURFACE OF THE PART ON FEED SPEED SELECTION OF THE ROTATING CUTTING TOOL

N. POPOK, I. KUNCEVICH, R. HMELNICKY, V. ANISIMOV

Influence of roughness of the spherical surface of the part on feed speed selection of the rotating cutting tool was examined. Goals of the study were formulated. Mathematical modeling of the studied process was carried out. The formulas for calculating the installation parameters of the cutting tool, workpiece and tool feed speed due to the roughness of the treated spherical surface of the part are specified. Results of sample processing of parts for given values of the roughness and the corresponding tool feed were analysed.

Keywords: spherical surface, treatment of the spherical surface, roughness, mathematical model, dependence of surface roughness from the tool feed.

УДК 629.3.02

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

канд. техн. наук, доц. А.А. РАКИЦКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрена методика разработки локальных моделей зон разрушения сложных конструкций. Предложены оригинальные способы ускорения стендовых испытаний при нерегулярном нагружении за счет исключения неповреждающих напряжений с учетом снижения предела выносливости деталей. Изложены результаты ускоренных испытаний моделей штампованного картера ведущего моста грузового автомобиля и прогнозирования его усталостной долговечности в типовых условиях эксплуатации, охватывающих различные категории дорог.

Ключевые слова: сопротивление усталости, ускоренные испытания, прогнозирование ресурса, неповреждающие напряжения, модель зон разрушения.

Современные машины проектируются на длительный срок эксплуатации, в течение которого они подвергаются значительному числу циклов нагружения различного уровня. Конструкторы и технологи пользуются расчетами, компьютерным моделированием, данными об аналогах и прототипах, однако актуальной всегда является задача экспериментальной проверки тех или иных решений. При этом предъявляются часто противоречивые требования, среди них главные – максимальная точность и достоверность результатов при минимальных временных и материальных затратах.

Многолетний опыт исследований автора в области усталостной долговечности несущих конструкций наземных мобильных машин позволяет рекомендовать два основных методических подхода к решению проблемы прогнозирования ресурса: во-первых, проводить испытания физических (локальных) моделей зон разрушения элементов сборочных единиц и, во-вторых, формировать программы стендового нагружения, моделирующие реальные условия эксплуатации с исключением неповреждающих циклов.

Предложенные подходы в данном исследовании рассмотрим на примере штампованных картеров ведущих мостов большегрузных автомобилей с точки зрения их долговечности.

Методология исследований. Стендовые испытания натурных конструкций показали, что наиболее слабым с точки зрения усталости звеном является место пересечения сварных швов соединения «банджо» 1 (корпуса центральной конической передачи моста) с клиновыми вставками 2 рукавов картера, в которых размещаются оси колес (рис. 1).

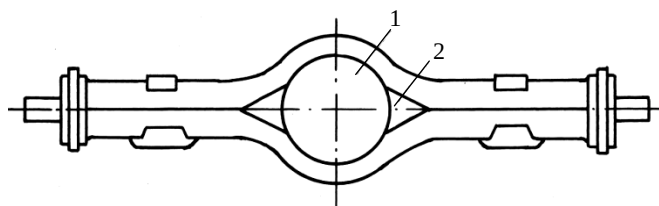


Рисунок 1 – Штампованной картер ведущего моста автомобиля МАЗ

Тщательное изучение усталостного излома, анализ схемы нагружения и напряженно-деформированного состояния деталей позволили разработать локальную модель, имитирующую «опасную зону» (рис. 2).

Модель представляет собой плоский образец, изготовленный из листов стали 17 ГС толщиной 12 мм, соединенных автоматической сваркой в среде углекислого газа. Стыковой шов, выполненный под углом $20 \pm 1^\circ$ к оси образца, воспроизводит шов приварки клиновой вставки. Сварка колец жесткости «банджо» моделируется приваркой поперечной накладки, длина которой меньше ширины образца. Таким образом достигается зарождение усталостных трещин именно на пересечении сварных швов. Исходные характеристики материала испытываемых моделей приведены в таблице 1.

Испытания на усталость проводились на стандартной сервогидравлической установке с осевым усилием до 250 кН. Для формирования программ нерегулярного стендового нагружения, эквивалентных реальным условиям эксплуатации конструкций, необходима регистрация действующих нагрузочных факторов и, соответственно, напряженно-деформированного состояния деталей.

Для автопоездов МАЗ в качестве типовых выбраны пять категорий дорог: асфальтобетонная, профилированный булыжник, булыжник ровного замощения, горные участки, городские улицы. Измерения

проводились на дорогах общего пользования, а также автополигона в городе Дмитрове Московской области. Общая протяженность записей в данном эксперименте составила порядка 500 км.

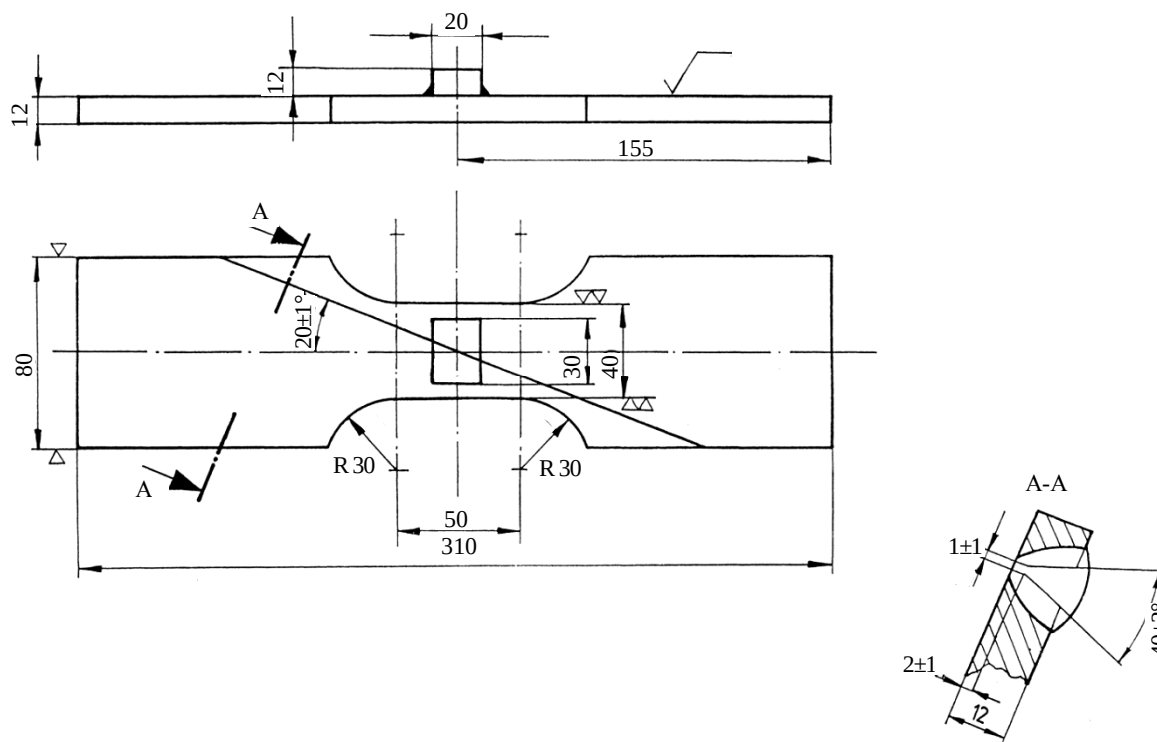


Рисунок 2 – Модель штампосварного картера

Таблица 1 – Характеристики материала испытываемых моделей

Химический состав, %						Пределы, МПа		
C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	прочности	текучести	выносливости
0,17	0,69	1,95	0,1	0,06	0,11	520	350	60

Для воспроизведения в стендовых условиях случайные процессы эксплуатационного нагружения требуют анализа и упорядочения, а именно выделения полных циклов, учета асимметрии и т.п. Наиболее эффективный и широко используемый – метод «падающего дождя» [1]. В результате обработки дорожных данных получена исходная матрица, представляющая собой распределение числа экстремумов, попадающих в один из 64 диапазонов напряжений, на которые разделена вся область зафиксированных напряжений.

Эксплуатационный спектр содержит значительный объем малых амплитуд типа наложенных на полные циклы вибраций. Их исключение, или фильтрация, обеспечивает существенное сокращение времени стендовых испытаний. Наиболее простая или очевидная методика фильтрации – это задание некоторого уровня исключаемых амплитуд, своеобразных «ворот при спуске горнолыжника по слаломной трассе», который сглаживает дорожные записи. Можно использовать более сложные аналитические способы ускорения стендовых испытаний, обеспечивающие повышение точности прогнозных оценок ресурса [2; 3].

Результаты исследований. В таблице 2 приведена программа стендового нагружения, эквивалентная пробегу автопоезда 260 км, в которой исключены напряжения менее 10% от максимальной амплитуды циклов, зарегистрированных при дорожных испытаниях.

Таблица 2 – Программа стендового нагружения с фильтрацией 10% максимальных амплитуд напряжений

Категория дорог	Количество мерных участков	Число зарегистрированных экстремумов	Число экстремумов после фильтрации	Процент сокращения экстремумов	Экстремальные значения напряжений, МПа		Параметры циклов стендового нагружения
					max	min	
Асфальт	15	10754	6796	37	+148	–70	47/26
Ровный булыжник	2	14935	11036	26	+288	–239	61/9
Профилированный булыжник	1	21980	16344	26	+287	–178	61/15
Горные дороги	1	26987	12328	54	+320	–204	64/12
Городские дороги	1	37447	18654	50	+320	–192	64/14

Конвертация полученных записей в параметры циклов стендового нагружения производится с помощью стандартного программного обеспечения испытательной машины. Испытания проводились с частотой нагружения до 20 Гц.

На рисунке 3 в качестве примера показана программа стендового нагружения до фильтрации, содержащая 3,76 млн полуциклов напряжений.

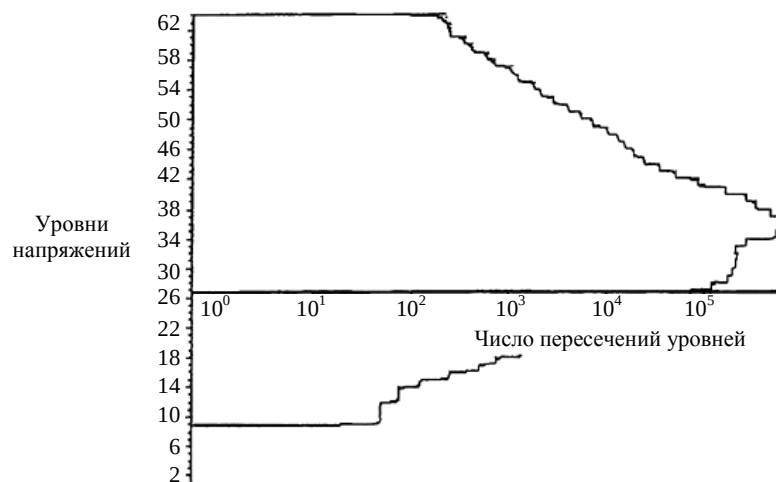


Рисунок 3 – Исходная программа стендового нагружения модели

Расчет эксплуатационного пробега производится по формуле:

$$L = Nkl,$$

где N – число блоков до разрушения модели; $k = 21,11$ – коэффициент конвертации измеренных в эксплуатации напряжений для воспроизведения при стендовых испытаниях; $l = 260$ км – эквивалент блока стендового нагружения.

Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные ускоренных испытаний моделей и расчета пробега

Нагрузочный блок			Число полуциклов до разрушения	Число блоков до разрушения	Расчетный пробег, км
характеристика	отфильтрованные напряжения	количество полуциклов			
Исходный схематизированный	–	157 300	25 977 190	165,1	906 168
			28 487 000	181,1	993 985
Сокращенный	Две диагонали асфальта исходного блока	100 798	15 351 648	152,0	834 267
	Две диагонали асфальта Одна диагональ исходного блока	62 528	10 084 800	161,3	885 311
			13 205 201	211,2	1 159 192
	Три диагонали схематизированного блока	26 250	4 832 625	184,1	1 010 451
			5 855 357	223,1	1 224 507
	Пять диагоналей схематизированного блока	9 050	1 089 674	120,4	поломка 23 мм от накладки
			2 463 000	272,2	1 493 997

Как видно из таблицы 3, при нагружении двух моделей без фильтрации напряжений число полуциклов до разрушения составило 25 977 190 и 28 487 000; число повторения блоков 165,1 и 189,1 соответственно; ресурс картера автомобиля в пределах 906...994 тыс. км, что соответствует проектным заводским данным.

При исключении двух диагоналей зарегистрированных полуциклов, соответствующих движению автомобиля по асфальтированному шоссе, уменьшение числа полуциклов в каждом блоке составляет 57 тыс., а в конечном итоге до разрушения модели сокращение достигает более 10 млн. полуциклов. Прогнозируемый ресурс конструкции при этом снижается до 834 тыс. км (примерно на 10%). Если из исходных блоков нагружения исключаются три или пять диагоналей напряжений, то, естественно, это приводит к росту циклической долговечности моделей.

На фотоснимках (рис. 4) показано типичное разрушение испытываемой модели. На изломе хорошо видны очаги зарождения трещин (ступеньки) в зоне пересечения сварных швов, а также полуэллиптические линии фронта распространяющихся усталостных трещин перед окончательным доломом.

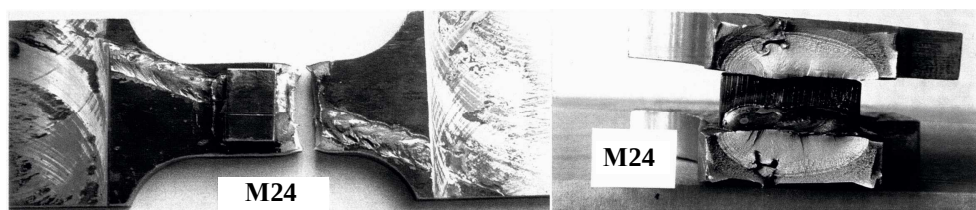


Рисунок 4 – Типичное разрушение в пересечении сварных швов модели

Графическое сопоставление результатов испытаний с расчетной кривой усталостной долговечности по модифицированной теории Майнера проиллюстрировано рисунком 5.

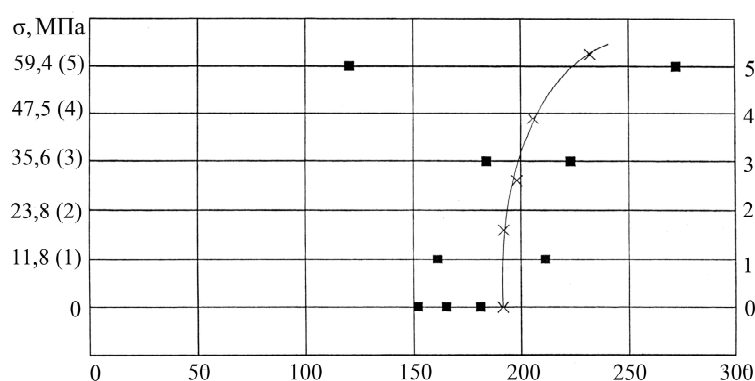


Рисунок 5 – Экспериментальные данные и расчетная кривая повреждения для моделей из стали 17 ГС (на оси ординат в скобках указаны номера диагоналей схематизированного спектра)

В расчет не принимается образец, разрушение которого, в отличие от всех других, наступило не в зоне пересечения сварных швов. Как видно из рисунка 5, исключение из записанных в дорожных условиях спектров даже трех диагоналей малых амплитуд (до 35,6 МПа) не приводит к существенному изменению долговечности и отклонению от данных об эксплуатационном ресурсе конструкции. Это позволяет рекомендовать на стадии формирования программ стендовых испытаний исключать амплитуды порядка 10% от зарегистрированных максимальных значений. При этом время испытаний сокращается на 80%, что соответствует коэффициенту ускорения 5.

Экспериментально проверен запатентованный способ ускоренного испытания материала на усталость [4]. В предлагаемом методе случайный (измеренный в эксплуатации) спектр заменяется на эквивалентную блок-программу циклов с постоянным коэффициентом асимметрии нагружения $R_\sigma = 0,1$. Максимальное напряжение – 380 МПа, частота нагружения – до 20 Гц. Все ступени до 0,7 предела выносятся в начале испытания. Далее они подключаются к нагружению по мере снижения предела выносливости. Фрагмент рандомизированной программы стендового нагружения дан на рисунке 6.

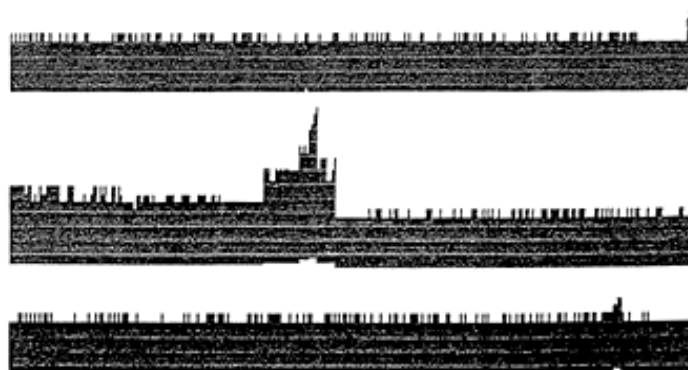


Рисунок 6 – Рандомизированная программа стендового нагружения

В таблице 4 приведены результаты стендовых испытаний моделей штампосварного картера по программе нагружения блоками, эквивалентными 260 км пробега, без фильтрации напряжений.

Таблица 4 – Результаты стендовых испытаний моделей при нагружении блоками, эквивалентными 260 километрам пробега

Программа блочного нагружения		Количество полуциклов до разрушения	Количество блоков до разрушения	Прогнозный пробег, км
число ступеней/блоков	число полуциклов			
17/40 18/34 19/25 20/1 20/294,8	181 600 230 792 261 350 15 470	5 234 147	393,8	2 161 410
17/40 -//- 20/240,9	181 600			
17/40 -//- 20/236,7	181 600			
17/40 -//- 20/263,6	181 600			
16/63 17/51 18/37 19/26 20/1 20/221,6	191 268 231 540 251 156 271 804 15 470			
		4 373 281	398,6	2 187 756

Исходная программа блочного нагружения по методу [4], эквивалентная эксплуатационному пробегу 485 км, содержала 10 ступеней (табл. 5).

Таблица 5 – Результаты стендовых испытаний моделей при нагружении блоками, эквивалентными 485 километрам пробега

Программа блочного нагружения		Количество полуциклов до разрушения	Количество блоков до разрушения	Прогнозный пробег, км
число ступеней/блоков	число полуциклов			
10/11 11/15 12/13 13/6 14/1 14/108,1	133 012 339 900 498 238 434 772 137 356	16 260 823	153,1	1 078 903
10/11 -//- 14/90,4	-//-			
10/11 -//- 14/98,8	133 012 -//-	14 977 082	143,8	1 013 365
10/42 11/16 12/13 -//- 14/75,6	507 864 362 560 -//-			
		12 180 949	152,6	1 075 380

По мере выработки ресурса и снижения предела выносливости до 134 МПа к повреждающему действию подключались более низкие ступени (до 14-й включительно). Разброс числа блоков до разрушения четырех образцов оказался в пределах допустимой погрешности эксперимента, прогнозируемый ресурс конструкции – порядка 1 млн км, что реально соответствует данным эксплуатации автомобилей. Тем не менее количество циклов стендового нагружения по программе 485 км примерно в 3 раза больше по сравнению с программой 260 км.

Проведенные эксперименты показали, что сложные и длительные дорожные записи могут быть значительно упрощены. Примерно 40% циклов до разрушения сокращается, что дает коэффициент ускорения испытаний, равный 1,7.

Закключение. Анализ результатов исследований позволил сделать следующие *выводы*:

- записи напряжений на штампосварном картере ведущего моста при движении грузового автомобиля по скоростному асфальтированному шоссе могут быть исключены из рассмотрения как неповреждающие, при этом число циклов нагружения сокращается вдвое;
- исключение трех средних диагоналей матрицы «падающего дождя» репрезентативного блока нагружения обеспечивает коэффициент «уплотнения» порядка 5; при этом отмеченный рост пробега на 20% свидетельствует о некотором влиянии исключаемых малых амплитуд; априори устанавливаемая граница повреждающих напряжений $0,1 \sigma_{\max}$ имеет право на применение;
- использование «жесткого» блока нагружения 260 км приводит к ускорению испытаний в 5 раз, однако прогнозируемый ресурс превышает в 2 раза эксплуатационные данные;
- более точные результаты дают испытания по программе 485 км, которая формируется на базе экстраполяции максимальных значений напряжений в область малой вероятности их появления 10^{-5} , 10^{-6} и с учетом влияния асимметрии нагружения; в этом случае коэффициент ускорения составляет 1,7 раза и достигается хорошее совпадение с ресурсом конструкции в реальной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шмелев, А.В. Критерии выбора методов схематизации нагруженности при прогнозировании ресурса несущих конструкций транспортных средств / А.В. Шмелев, А.А. Ракицкий // Вестн. Гомельского ГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. – № 4. – С. 23–28.
2. Способ испытания конструкции на усталостную долговечность: а. с. 1627902 СССР / А.А. Ракицкий, В.И. Шоломицкий, М.И. Горбацевич, А.К. Бернацкий // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 6.
3. Способ испытания конструкции на усталостную долговечность: а. с. 1696954 СССР / А.А. Ракицкий, В.И. Шоломицкий, А.К. Бернацкий, А.М. Григорчук // Открытия. Изобретения. – 1991. – № 45.
4. Способ ускоренного испытания материала на усталость: пат. 2028602 РФ / Е.К. Почтенный, А.А. Ракицкий, В.И. Шоломицкий // Изобретения. – 1995. – № 4.

Поступила 15.01.2016

SERVICE LIFE PREDICTION FOR MOBILE MACHINE STRUCTURES BY RESULTS OF RANDOM ACCELERATED TESTS

A. RAKITSKY

A technique of a local model development for fracture zones of complex structures is examined. The original accelerated test methods under irregular loading by omitting of non-damaging stresses with regard for a fatigue limit lowering of components are proposed. The results of accelerated tests for models of a truck driving axle stamp-welded case and data of a prediction its fatigue endurance under typical service conditions which covers different categories of roads are stated.

Keywords: fatigue endurance, accelerated tests, service life prediction, non-damaging stresses, model of fracture zones.

УДК 631.352:631.311.5

**ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАПЕЦИЕВИДНЫХ НОЖЕЙ
НА РОТОРНЫХ КОСИЛКАХ**

*канд. техн. наук, доц. Е.И. МАЖУГИН; канд. техн. наук, доц. С.Г. РУБЕЦ;
канд. техн. наук, доц. А.В. ПАШКЕВИЧ
(Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки)*

Исследуется взаимодействие ножей роторной косилки с растительностью. Анализируется влияние скорости рабочего передвижения косилки при рассмотрении процесса отклонения ножей от радиального положения во время скашивания. На основе теоретического анализа схем взаимодействия ножа со срезаемой растительностью обосновано использование ножей трапецевидной формы. Приведена схема взаимодействия трапецевидного ножа с растительностью, учитывающая все значимые усилия, действующие в процессе срезания. На основе анализа данной схемы получены уравнения для определения угла отклонения ножей от радиального положения.

Ключевые слова: *роторная косилка, трапецевидные ножи, схемы взаимодействия ножа с растительностью, плоскость среза, выражения для определения угла отклонения ножа.*

Введение. Скашивание травяной растительности на сельскохозяйственных угодьях выполняется в основном многороторными косилками. Их режущими элементами чаще всего являются прямоугольные ножи, которые шарнирно прикреплены к несущей части ротора, обычно называемой диском. Срезание растительности происходит при ударе ножа по растению. Разрушение растения в плоскости среза происходит благодаря инерции растения и высокой окружной скорости ножа. Такой способ срезания растительности называется инерционным или бесподпорным. Несмотря на широкое распространение подобных косилок и длительный опыт их практического использования круг теоретических исследований работы этих косилок ограничен, что сокращает возможности в теоретическом обосновании оптимальных параметров косилок. Особенно данное положение проявляется при использовании многороторных косилок для окашивания неудобц, обочин дорог, мелиоративных каналов и т.п. При работе роторной косилки зачастую требуется не только высокая скорость ножей, обеспечивающая качественное срезание тонкостебельной травяной растительности, но и высокая энергия воздействия ножей на жесткие стебли, срезание которых происходит за счет удара по стеблю. В связи с этим возникает необходимость дальнейшего теоретического исследования взаимодействия ножей косилки с растительностью.

Существенный вклад в теоретическое и экспериментальное изучение данной проблемы внесли Е.С. Босой [1], И.Ф. Василенко [2] Е.М. Гутьяр [3], В.А. Желиговский [4], А.Ю. Ишлинский [5], В.И. Фомин [6], Б.Н. Штомпель [7] и другие. Обобщающим трудом в данной сфере можно считать собрание сочинений В.П. Горячкина [8]. Однако эти исследования посвящены роторным косилкам, у которых ротор представляет собой диск с жестко прикрепленными к нему сегментными ножами.

Работу косилок с шарнирно прикрепленными к дискам ножами изучали В.М. Мартынов [9], Н.Е. Резник [10] и другие ученые [11]. Данная проблема также исследовалась в ряде диссертационных работ [12–15].

В известных теоретических работах [9–15] предлагаются расчетные схемы, в которых значимыми и учитываемыми нагрузками, действующими на нож в процессе скашивания, считаются центробежная сила и сила сопротивления растительности срезанию. Такая схема является достаточно упрощенной и не учитывает влияния скорости рабочего передвижения косилки. Данный фактор необходимо учитывать при рассмотрении вопроса чрезмерного отклонения ножей от радиального положения. Чрезмерное отклонение ножей приводит к нарушению процесса срезания растительности и снижению эффективности работы косилки.

Основная часть. При проведении исследований использовался метод теоретического анализа процесса взаимодействия ножа косилки, шарнирно прикрепляемого к диску ротора, со стеблем растительности при учете окружной скорости ножей и поступательной скорости косилки.

На рисунке 1 показана схема работы многороторной косилки с нижним приводом роторов [16], где v_n – поступательная скорость перемещения режущего аппарата; v_o – окружная скорость концов ножей; l_n – величина перекрытия; D_p – диаметр ротора по концам ножей; B_z ширина захвата.

Режущий аппарат komponуется так, чтобы для отсутствия приминания растительности корпусом траектории концов ножей (см. рис. 1) пересекались за пределами контура корпуса редуктора (точки А).

Траекторией конца ножа движущейся косилки является циклоида, поэтому при каждом обороте ротора нож захватывает серповидную зону растительности.

При скашивании растительности роторной косилкой с шарнирно прикрепленными к несущей части ротора ножами могут возникнуть различные случаи или варианты перерезания растительности. Их деление по вариантам зависит от угла γ , образуемого вектором скорости ножа и нормальной составляющей вектора силы резания.

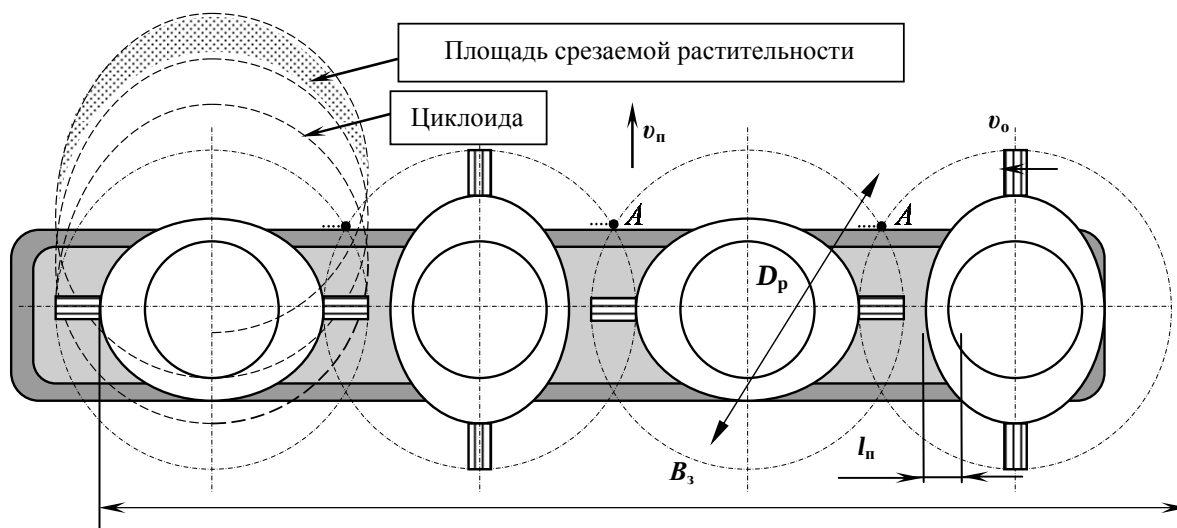


Рисунок 1 – Схема работы и параметры роторной косилки

Обычно при резании растительности рассматривают три варианта: первый – нормальное резание или рубка; второй – косое резание; третий – скользящее резание [17].

Первый вариант характеризуется тем, что вектор нормальной составляющей силы резания и вектор скорости совпадают по направлению. Второй – охватывает ситуации, при которых угол наклона вектора скорости γ не превышает угла трения τ материала ножа о перерезаемый стебель.

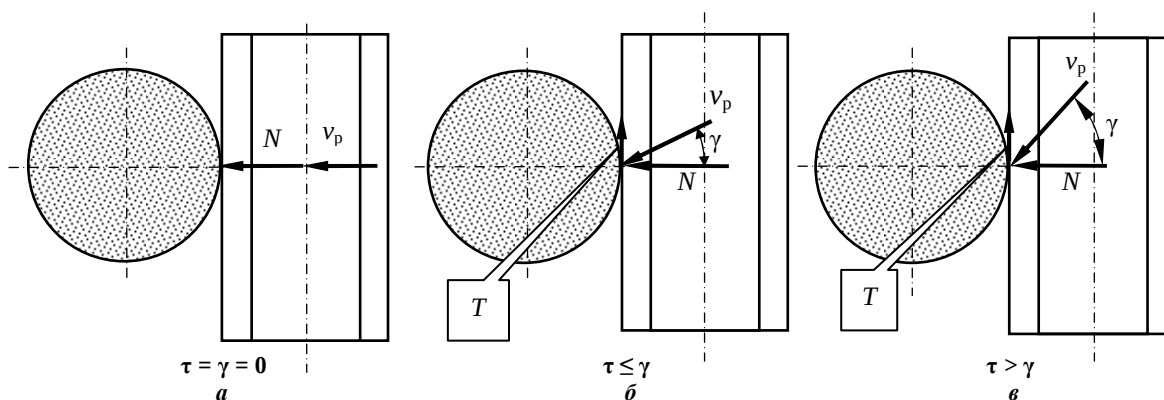
Значение угла τ может быть определено по следующему соотношению:

$$\tau = \arctg\left(\frac{T}{N}\right), \quad (1)$$

где T – сила трения материала ножа о перерезаемую растительность; N – нормальная составляющая силы резания.

Тогда можно записать, что косому резанию соответствует неравенство $\tau \leq \gamma$. Скользящему резанию, т. е. третьему варианту, – неравенство $\tau > \gamma$.

Схематически данные случаи перерезания стеблей растений поясним на рисунке 2.



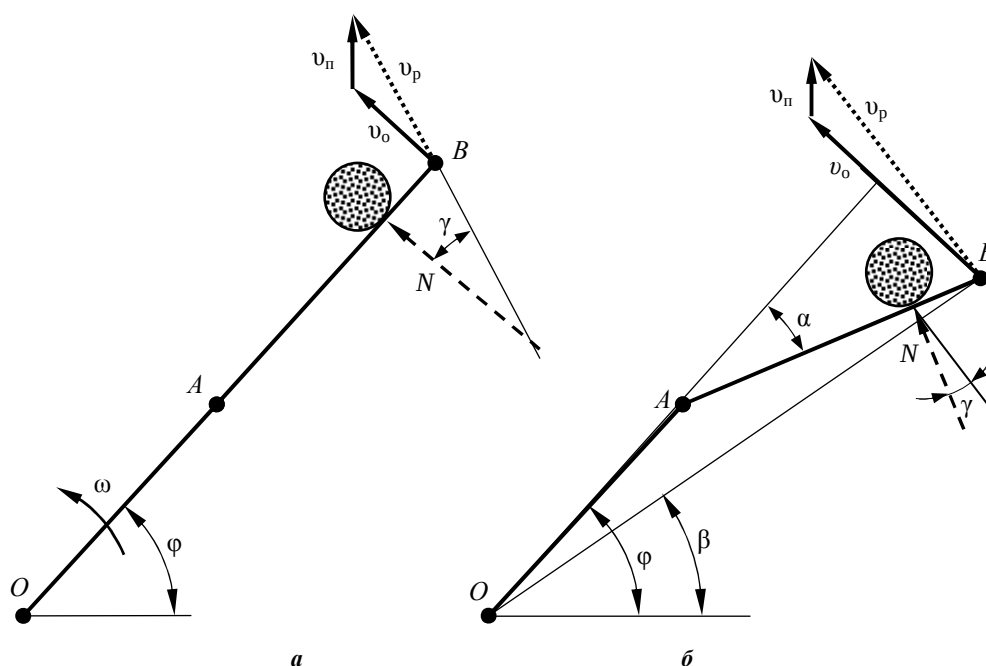
а – схема, соответствующая нормальному резанию; б – косому; в – скользящему

Рисунок 2 – Схемы перерезания стебля растения

Кроме того, необходимо пояснить, что по ориентации плоскости среза по отношению к оси растения различают перпендикулярное и наклонное резание. Нормальное резание, или рубка, является частным случаем перерезания растений. Оно может иметь место только при условии, что $v_n = 0$ или v_n и v_o

совпадают, или противоположны по направлению. Это возможно только при входе ножа в зону резания и при выходе из нее. Но при работе косилки скорость v_n не может быть равна нулю, а конструктивно у многороторных косилок, имеющих перекрытие траекторий концов ножей, скорости v_n и v_o не могут совпадать или иметь противоположное друг другу направления. Поэтому в данном случае вариант нормального резания рассматривать не имеет смысла. При косом или скользящем резании на режущей кромке возникает сила трения, направленная вдоль кромки и создающая момент, стремящийся отклонить нож от радиального положения. Отклонения ножа меняют угол между вектором скорости резания и нарушают процесс резания.

При работе роторной косилки угол наклона вектора скорости резания является величиной непостоянной, зависящей от окружной скорости ротора v_o и скорости рабочего передвижения косилки v_n . На рисунке 3 приведены схематически кинематические соотношения при перерезании стебля растения ножом роторной косилки.



a – нож в радиальном положении; *б* – нож отклонился на угол α

Рисунок 3 – Схемы кинематических соотношений при перерезания стебля растения

Нож в данном случае упрощенно представлен в виде стержня длиной AB . При отсутствии сопротивления срезанию растительности нож занимает радиальное положение (рис. 3, *a*). Для этого случая геометрическое сложение векторов v_o и v_n дает выражение для расчета v_p :

$$v_p = \sqrt{v_o^2 + v_n^2 + 2 v_o v_n \cos \varphi}, \quad (2)$$

где φ – угол поворота ротора от исходного положения, соответствующего горизонтальному положению OA и AB .

Значение φ определяется как

$$\varphi = \omega \cdot t, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость ротора, рад/с; t – рассматриваемый промежуток времени поворота ротора, с.

На основании теоремы синусов можно записать

$$\sin \gamma = (v_n \sin \varphi) / v_p. \quad (4)$$

Для скользящего резания требуется выполнение условия $\tau > \gamma$.

Тогда

$$\sin \tau > \frac{v_n \sin \varphi}{\sqrt{v_o^2 + v_n^2 + 2 v_o v_n \cos \varphi}}. \quad (5)$$

После некоторых преобразований получим

$$\sin \tau \sqrt{v_o^2 + v_n^2 + 2 v_o v_n \cos \varphi} > v_n \sin \varphi. \quad (6)$$

Введем следующее соотношение

$$v_o = a v_n, \quad (7)$$

где a – соотношение между окружной и поступательной скоростями.

Подставим в уравнение (6) вместо v_o его выражение из соотношения (7):

$$\sin \tau \sqrt{(a^2 + v_n^2 + v_n^2 + 2a v_n^2 \cos \varphi)} > v_n \sin \varphi. \quad (8)$$

Разделив обе части неравенства (8) на v_n , имеем

$$\sin \tau \sqrt{a^2 + 1 + 2a \cos \varphi} > \sin \varphi. \quad (9)$$

После некоторых преобразований получим

$$a^2 + 2a \cos \varphi + 1 - (\sin^2 \varphi) / \sin^2 \tau > 0. \quad (10)$$

Из неравенства (10) следует, что вид резания зависит от соотношения окружной скорости ножей и поступательной скорости косилки, угла трения лезвия ножа о перерезаемую растительность и угла поворота ротора. По форме неравенство является квадратным неравенством. Тогда его решение относительно соотношения a будет иметь вид

$$a > -\cos \varphi \pm \sqrt{-\sin^2 \varphi + \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \tau}}. \quad (11)$$

По форме решения (11) видно, что дискриминант будет больше или равен нулю при изменении угла φ от 0 до π и угла τ от 0 до $\pi/2$. Следовательно, неравенство (11) имеет действительные корни.

Угол трения стали о травяную растительность близок к 40° [18]. При подстановке этого значения в неравенство (11) установлено, что при изменении φ от 0 до π соотношение a меняется в диапазоне $\pm 1,56$. То есть для обеспечения резания со скольжением достаточно, чтобы окружная скорость в 1,56 раза была больше или меньше скорости рабочего передвижения. В действительности у современных косилок окружная скорость в 20...50 раз больше скорости передвижения. Это говорит о том, что срезание растительности, согласно модели, представленной на рисунке 3, a , является косым.

На основании данного рисунка можно записать следующее неравенство:

$$v_n^2 \sin^2 \tau - v_n^2 \sin^2 \varphi + 2v_o v_n \cos \varphi \cdot \sin \tau + v_o^2 \sin^2 \tau > 0. \quad (12)$$

Отсюда можно получить условие, при котором будет обеспечено резание со скольжением. Решение неравенства (12) относительно скорости рабочего передвижения косилки позволяет получить аналитическое выражение для расчета значения данной величины, при котором будет происходить резание со скольжением. После некоторых преобразований оно приводится к виду

$$v_n > \frac{-v_o \cdot \sin \tau (\cos \varphi \pm 1) \cos \tau}{\sin^2 \tau - \sin^2 \varphi}. \quad (13)$$

Однако более адекватной реальному процессу кошения является модель, представленная на рисунке 3, b . Здесь учтено то, что в процессе кошения ножи под воздействием сил сопротивления отклоняются назад против направления резания. Угол отклонения здесь обозначен как α . Тогда, исходя из того, что в сравнении со схемой (рис. 3, a), уравнение (4) запишется следующим образом:

$$\sin(\alpha - \gamma) = \frac{v_n \sin \varphi}{v_p}. \quad (14)$$

Выполнив последующие действия, получим

$$v_n > \frac{-v_o \sin(\alpha - \gamma) \cdot (\cos \varphi \pm 1) \cos(\alpha - \gamma)}{[\sin(\alpha - \gamma) - \sin^2 \varphi]}. \quad (15)$$

Анализ уравнений (11), (13) и (15) показывает, что у современных многороторных косилок срезаение растительности является косым или скользящим. При этом возникающая на режущей кромке ножа сила трения, направленная вдоль режущей кромки, будет способствовать отклонению ножа от радиального положения. Уменьшение отклоняющего момента обеспечивается применением ножей, запатентованной авторами [19] формы (рис. 4).

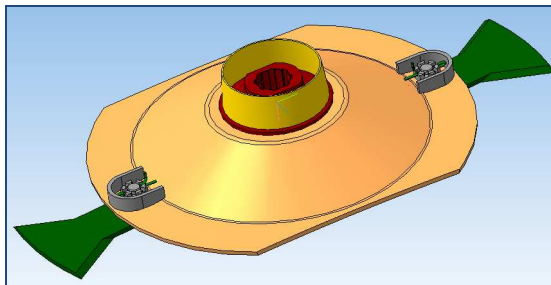


Рисунок 4 – Схема ротора с трапецевидными ножами

Режущие кромки ножей расположены радиально по отношению к отверстию для болта крепления ножа к диску и выполнены расширяющимися к периферии, а внешняя торцовая кромка изготовлена по дуге окружности с центром, совпадающим с центром ротора. Выступающая за пределы ротора часть ножа имеет форму, близкую к форме равнобедренной трапеции. Впоследствии ножи данной формы были названы трапецевидными ножами [20].

Вращающийся вместе с ротором, шарнирно присоединенный к нему нож благодаря действию центробежных сил располагается в радиальном положении. При встрече с растительностью нож срезает ее заостренной режущей кромкой. Возникающая при этом сила сопротивления, действующая на режущую кромку со стороны растительности, отклоняет нож назад против направления вращения. Возникающее скольжение режущей кромки по скашиваемой растительности не приводит к увеличению отклонения ножа, поскольку сила трения режущей кромки о растительность не создает отклоняющего нож момента вследствие того, что плечо силы трения относительно центра отверстия в пластине равно нулю, так как режущая кромка расположена радиально. Поскольку выступающая за пределы диска трапецевидная часть ножа выполнена расширяющейся к периферии, центр масс ножа также смещен к периферии, что увеличивает плечо центробежной силы, действующей на нож, и тем самым способствует стабилизации его положения.

Во избежание трения внешней торцовой кромки о нескошенную растительность кромка изготовлена по дуге окружности с центром, совпадающим с центром ротора, и при срезании растительности некоторое отклонение ножа приводит к соответствующему повороту внешней кромки и удалению ее нерабочей части от несрезанной растительности. Все это позволяет повысить динамическую устойчивость ножа благодаря тому. Кроме того, поскольку нож выполнен расширяющимся к периферии, он имеет большую массу, и к тому же его центр масс более удален от центра болта крепления к ротору, соответственно и его момент инерции также больше, чем у прямоугольного ножа.

Проведенные ранее теоретические исследования [21] позволили обосновать схему (рис. 5), которая учитывает все значимые усилия, действующие на нож роторной косилки при срезании травянистой и древесно-кустарниковой растительности, такие как: F_p – сила сопротивления срезанию, действующая на режущую кромку ножа со стороны стебля растительности, Н; $F_{тр}$, $F_{тр.с}$ – соответственно силы трения режущей кромки о растительность и трения плоскости ножа о стержень, Н; $F_{ц.б.}$, $F_{ин}$ – соответственно центробежная сила и сила инерции, препятствующая отклонению ножа, Н; F_x , F_y – составляющие реакции в шарнире, направленные по осям X и Y соответственно, Н; $R_{ш}$ – суммарная реакция в шарнире, Н; $M_{тр}$ – момент сил трения в шарнире, Н·м; $I_{ин}$ – момент инерции, препятствующий повороту ножа, кг·м².

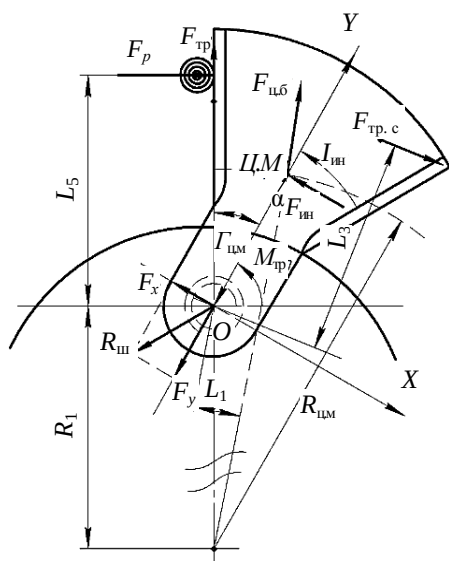


Рисунок 5 – Схема взаимодействия трапецевидного ножа с растительностью

В результате анализа процесса взаимодействия ножа со стеблем растительности [20] получено выражение для определения угла отклонения ножа от радиального положения для прямоугольных ножей:

$$\alpha = \arcsin \frac{F_p (L_5 + f \cdot L_2) - I_{ин} \cdot \varepsilon}{m_n \cdot \omega_n^2 \cdot r_{ц.м} (f_1 \cdot r + R_1)}, \quad (16)$$

где L_5 и L_2 – плечи действия сил, м; f и f_1 – коэффициенты трения ножа о растительность и трения в шарнире соответственно; ε – угловое ускорение ножа, рад/с²; m_n – масса ножа, кг; ω_n – угловая скорость ножа, рад/с; $r_{ц.м}$ – расстояние от оси крепления ножа до центра масс ножа, м; r – радиус отверстия под болт крепления ножа к ротору, м; R_1 – расстояние между осью вращения ротора и осью поворота ножа, м.

Формула (16) показывает, что величина угла отклонения ножа от радиального положения зависит от геометрических размеров, массы ножа, момента инерции ножа относительно оси крепления, а также расстояния, на котором находится центр масс ножа относительно оси крепления к ротору. Ножи с более удаленным центром масс и большим моментом инерции будут отклоняться на меньший угол.

Тогда уравнение, позволяющее определить угол отклонения трапецевидного ножа от радиального положения, запишется в следующем виде:

$$\alpha = \arcsin \frac{F_p \cdot L_5 - I_{ин} \cdot \varepsilon}{m_n \cdot \omega_n^2 \cdot r_{ц.м} (f_1 \cdot r + R_1)}. \quad (17)$$

Уравнение (17) показывает, что использование ножа предлагаемой конструкции позволяет повысить динамическую устойчивость ножа.

Таким образом, можно предположить, что нож предлагаемой конструкции в процессе срезания будет отклоняться на меньшую величину по сравнению с ножом прямоугольной формы. Проведенные лабораторные исследования и производственные испытания [20] подтвердили данное предположение.

Закключение. У современных многороторных косилок срезание растительности является в основном косым или скользящим. Возникающая на режущей кромке ножа сила трения, направленная вдоль режущей кромки, способствует отклонению ножа от радиального положения. Уменьшение отклоняющего момента обеспечивается запатентованным авторами трапецевидным ножом. На основании расчетной схемы, учитывающей все значимые усилия, действующие на нож роторной косилки при срезании растительности, получены выражения для определения угла отклонения ножа от радиального положения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Босой, Е.С. Скорость резания стеблей сельскохозяйственных культур / Е.С. Босой // Сельхозмашина. – 1953. – № 4. – С. 12–13.
2. Василенко, И.Ф. Теория режущих аппаратов жатвенных машин / И.Ф. Василенко // Труды ВИСХОМ. – М., 1937. – Сб. 5. – С. 7–114.
3. Гутьяр, Е.М. К теории резания стеблей / Е.М. Гутьяр // Сельскохозяйственные машины. – 1931. – № 7. – С. 12–13.
4. Желиговский, В.А. Экспериментальная теория резания лезвием / В.А. Желиговский // Труды МИМЭСХ. – М., 1940. – Вып. IX. – С. 27.
5. Ишлинский, А.Ю. Задача о скорости косыбы злаков / А.Ю. Ишлинский // Сельскохозяйственная машина. – 1937. – № 5–6. – С. 9–10.
6. Фомин, В.И. Обоснование параметров косилочного режущего аппарата сегментно-дискового типа: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / В.И. Фомин. – Ростов н/Д, 1963. – 22 с.
7. Штомпель, Б.Н. Исследование технологического процесса кошения трав ротационными косилками / Б.Н. Штомпель. – Минск: Изд-во Акад. с.-х. наук БССР, 1961. – 51 с.
8. Горячкин, В.П. Собрание сочинений: в 3 т. / В.П. Горячкин. – М.: Колос, 1965. – Т. 3. – 384 с.
9. Мартынов, В.М. Геометрия ножа ротационного режущего аппарата / В.М. Мартынов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 3. – С. 34–36.
10. Резник, Н.Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н.Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.
11. Jonson, C.E. Horizontal rotary mower blade dynamics / C.E. Jonson, W.D. Robinson, J.L. Turner // TRANSACTIONS of the ASAE. – 1984. – Bd. 27, № 6. – P. 1666–1668.
12. Каифаш, Ф. Обоснование динамических параметров и режима работы ротационного режущего аппарата: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Ф. Каифаш. – М.: Моск. ин-т инж. с.-х. пр-ва им. В.П. Горячкина, 1982. – 158 с.

13. Карпенко, М.И. Обоснование оптимальных технологических параметров ротационного режущего аппарата косилок с пониженной скоростью ножей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / М.И. Карпенко. – Глеваха, 1984. – 17 с.
14. Погорелец, А.Н. Технологические и технические основы совершенствования ротационного режущего аппарата уборочных машин: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Погорелец; Украин. с.-х. акад. – Киев, 1975. – 18 с.
15. Смирнов, Г.А. Обоснование параметров унифицированного ротационного режущего аппарата машин для кошения: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Г.А. Смирнов. – М., 1988. – 177 с.
16. Мажугин, Е.И. Машины для эксплуатации мелиоративных и водохозяйственных объектов: учеб. пособие / Е.И. Мажугин. – Горки: БГСХА, 2010. – 333 с.
17. Завражнов, А.И. Механизация приготовления и хранения кормов / А.И. Завражнов, Д.И. Николаев. – М.: Агропромиздат, 1990. – 336 с.
18. Васильев, Б.А. Мелиоративные машины / Б.А. Васильев, В.Б. Гантман, В.В. Комиссаров; под общ. ред. И.И. Мера. – М.: Колос, 1980. – 351 с.
19. Нож роторной косилки: пат. 16507 Респ. Беларусь, МПК A01D 34/01 / В.А. Шаршунов, Е.И. Мажугин, С.Г. Рубец; заявитель Белорус. гос. с.-х. акад. № u 20090720; заявл. 19.05.09; опубл. 30.10.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5 – С. 44.
20. Рубец, С.Г. Скашивание древесно-кустарниковой растительности на мелиоративных объектах много-роторной косилкой с трапециевидными ножами: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / С.Г. Рубец. – Минск: НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2013. – 154 с.
21. Мажугин, Е.И. Обоснование расчетной схемы ножей мелиоративной много-роторной косилки / Е.И. Мажугин, С.Г. Рубец // Энергоресурсосберегающие технологии и технические средства для их обеспечения в сельскохозяйственном производстве: материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 25–26 авг. 2010 г. / РУП «НППЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»; редкол.: П.П. Казакевич [и др.]. – Минск, 2010. – С. 40–43.

Поступила 22.12.2015

JUSTIFICATION FOR USE TRAPEZOIDAL BLADES ON ROTARY MOWERS

E. MAZHUGIN, S. RUBEC, A. PASHKEVICH

In the paper substantiates the necessity of theoretical investigation the interaction of a rotary mower blades with vegetation. It demonstrated the need to address the impact of the speed of movement of the working mower when considering the process of deviation from the radial position of the blades during mowing. Based on the theoretical analysis of patterns of interaction knife with cut vegetation substantiates the necessity of the use of knives trapezoidal shape. It was shown the scheme of interaction trapezoidal blade with vegetation, taking into account all relevant existing efforts in the process of cutting. On the basis of analysis of the scheme derived the equations for determining the angle of deviation from the radial position.

Keywords: rotary mower, trapezoidal knives, scheme of interaction trapezoidal knife with vegetation, shear plane, equations for determining the angle of deviation of knife.

УДК 62174; 621.753

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ РУБИЛЬНЫХ НОЖЕЙ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ****д-р техн. наук, проф. А.В. АЛИФАНОВ; В.В. ЦУРАН**
(Барановичский государственный университет);**канд. техн. наук А.М. МИЛЮКОВА**
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)

Представлены результаты производственных испытаний рубильных ножей, изготовленных по специально разработанной технологии. В ходе проведенных работ из стали 6ХВ2С, поставляемой на белорусский рынок из России, изготовлены комплекты опытных образцов рубильных ножей, предназначенных для испытаний в производственных условиях на деревообрабатывающих предприятиях республики. Производственные испытания всех опытных ножей, изготовленных в соответствии с разработанными техпроцессами, показали их соответствие производственным требованиям, а также требованиям ГОСТов, что позволяет рекомендовать такой тип ножей для широкого внедрения на деревообрабатывающих предприятиях, специализирующихся на производстве технологической щепы.

Ключевые слова: рубильные машины, производственные испытания, механические свойства, геометрические параметры, изнашивание, микротрещины, переточка.

С целью сокращения валютных средств, затрачиваемых на приобретение рубильных ножей, используемых на деревообрабатывающих предприятиях, для получения технологической щепы, Правительством Республики Беларусь в 2012 году дано указание разработать отечественную прогрессивную технологию изготовления рубильных ножей и организовать их производство. Головной организацией разработки назначен Физико-технический институт НАН Беларуси, соисполнителем – Барановичский государственный университет, организацией-изготовителем – филиал ЗАО «Атлант» – Барановичский станкостроительный завод (БСЗ). В результате проведения научно-исследовательских, конструкторских, технологических и опытно-производственных работ разработана конструкторская и технологическая документация, а также изготовлены опытные партии рубильных ножей, предназначенных для использования на различных рубильных машинах, установленных на соответствующих деревообрабатывающих предприятиях республики. В частности, на ОАО «Минскдрев», ОАО «Ивацевичдрев», ОАО «Витебскдрев», ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев»» в 2013–2014 годах проведены производственные испытания опытных образцов ножей, изготовленных по разработанным в ФТИ НАН Беларуси и БарГУ технологиям из сталей 6ХВ2С.

Основные требования к проведению производственных испытаний. Рубильные ножи, изготавливаемые для проведения испытаний, должны соответствовать ГОСТ 17342-81 [1]. Перед проведением испытаний древесное сырье тщательно проверяется на отсутствие минеральных, металлических и других включений. Через каждые 2 часа работы необходимо проводить контроль состояния рубильных ножей на наличие трещин, забоин, сколов, замеры величины износа режущей кромки (радиуса режущей кромки по всей длине не менее, чем в трех сечениях методом слепков). Рубильные ножи должны обеспечивать получение технологической щепы, соответствующей ГОСТ 15815-83 [2]. Установленный период стойкости ножей при переработке окоренной древесины хвойных пород без металлических и минеральных включений, влажностью не ниже 50%, при температуре не ниже минус 10 °С должен составлять не менее 360 мин. Процесс рубки щепы ведется до затупления режущей кромки ножей. По мере затупления весь комплект ножей демонтируется и подвергается переточке в цехе предприятия. Результаты испытаний ножей (отработанное время до очередной переточки, радиус изношенной режущей кромки) необходимо заносить в протокол, в котором учитывается и количество переработанной древесины.

Основная часть. В соответствии с договором ОАО «Минскдрев» № 2013/119 от 30.05.2013 проведены предварительные испытания опытных образцов ножей ФТИ5.001.1674 (1 комплект) для рубильной машины МРГ-20 представленной на рисунке 1, которые были изготовлены на опытном производстве в Физико-техническом институте НАН Беларуси (акт изготовления № 4.2/1) по ранее разработанной конструкторской и технологической документации.

В процессе испытаний ножи обеспечили получение технологической щепы по ГОСТ 15815-83 [2], период стойкости при переработке окоренной древесины хвойных пород (сосны) без металлических и минеральных включений влажностью не ниже 50% при температуре не ниже минус 10 °С составил 400 мин. Рубка велась до затупления режущей кромки ножа. По мере затупления ножей весь комплект демонтировался и подвергался переточке в цехе предприятия (произведено 4 переточки). Переточка ножей (демонтаж ножей) включает: наладку заточного оборудования; контроль режимов заточки; контроль точно-

сти установки ножей на рубильную машину. Испытания ножей соответствовали требованиям к их проведению, обозначенным выше.

Результаты, полученные в ходе испытаний исследуемых ножей, позволили рекомендовать их к использованию на деревообрабатывающих предприятиях после доработки конструкторской документации и технологии изготовления с целью повышения стойкости непрерывной работы ножей до 420 мин и более.

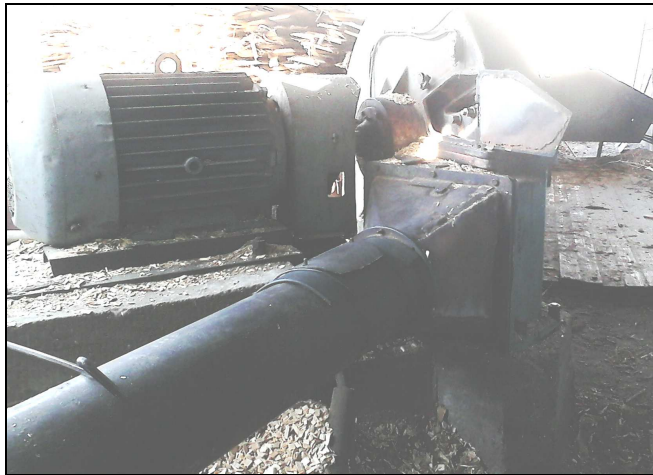


Рисунок 1 – Рубильная машина МРГ-20 на ОАО «Минскдрев»

Рубильная машина должна соответствовать паспортным данным и нормам точности по требованиям ГОСТ и ее необходимо подготовить к проведению испытаний.

Произвести проверку на геометрическую точность:

- биение ножевого вала не более 0,02 по всей длине (не менее чем в трех плоскостях);
- неперпендикулярность оси ножевого вала к направлению подачи материала не более 5 град на 1000 мм;
- непараллельность оси ножевого вала плоскости контрножа не более 0,1 мм на 1000 мм.

При обнаруженных отклонениях от нормируемых величин выявить причины и устранить их (зазор в подшипниках, изгиб вала).

Таким образом, подготовка рубильных ножей к испытаниям заключается в проверке на соответствие конструктивным параметрам машины и установке рубильных ножей при контроле точности установки, изменения зазоров с контрножом.

Производственные испытания рубильных ножей на ОАО «Ивацевичдрев». В соответствии с договором № 2012/117 от 07.06.2013 на ОАО «Ивацевичдрев» проведены производственные испытания опытных образцов ножей модели ФТИ5.001.1671 длиной 460 мм (рис. 2), техническую документацию на которые разработал БарГУ, изготовил филиал ОАО «Атлант» – БСЗ.

Испытания проводились в цехе рубки щепы по программе и методике ФТИ 0.316 ПМ «Ножи для рубки щепы». Условия проведения испытаний приведены выше.

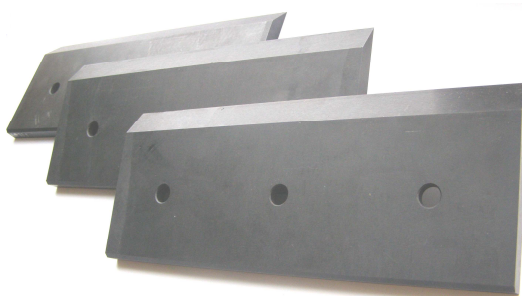


Рисунок 2 – Опытный образец ножа для рубки щепы ФТИ5.001.1671

Ножи, подвергаемые испытаниям, обеспечили получение технологической щепы по ГОСТ 15815-83 [2], период стойкости при переработке окоренной древесины хвойных пород (сосны) без металлических и минеральных включений влажностью не ниже 50% при температуре не ниже минус 10 °С составил 380 мин.

Рубка велась до затупления режущей кромки ножа. По мере затупления ножей весь комплект демонтировался и подвергался переточке в цехе предприятия. Переточка ножей (демонтаж ножей) включает наладку заточного оборудования, контроль режимов заточки, контроль точности установки ножей на рубильную машину. Произведено 5 переточек.

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанные ножи к использованию на деревообрабатывающих предприятиях после доработки технологии изготовления с целью повышения их стойкости до 400 мин и более.

Опытные образцы исследованы на предмет изменений геометрических параметров, сохранения механических свойств.

Испытания ножей для рубильных машин на ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев». В соответствии с договором с ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев» № 2013/122 от 18.06.2013 проведены предварительные испытания опытных образцов ножей ФТИ5.001.1685 (1 комплект) для рубильной машины ДО-51, которые были изготовлены на опытном производстве в Физико-техническом институте НАН Беларуси (рис. 3, акт изготовления № 4.2/1).



Рисунок 3 – Опытные образцы ножей для рубки щепы ФТИ5.001.1685

Испытания проводились в цехе рубки щепы по программе и методике ФТИ 0.316 ПМ «Ножи для рубки щепы». По мере затупления ножей весь комплект демонтировался и подвергался переточке в цехе предприятия. Было произведено 5 переточек. Результаты испытаний позволяют рекомендовать их к использованию на деревообрабатывающих предприятиях после доработки конструкторской документации технологии изготовления с целью повышения их стойкости до 420 мин и более.

Испытания ножей для рубильных машин на ОАО «Витебскдрев». В соответствии с договором с ОАО «Витебскдрев» № 2013/118 от 28.06.2013 проведены испытания опытных образцов ножей ФТИ5.001.1675 длиной 700 мм (1 комплект) для рубильной машины МРН-100 (Россия), которые были изготовлены на филиале ЗАО «Атлант» – БСЗ (рис. 4).



Рисунок 4 – Опытные образцы ножей для рубки щепы ФТИ5.001.1675

Проведенные испытания показали, что ножи обеспечивают получение технологической щепы по ГОСТ 15815-83, период стойкости при переработке древесины хвойных (сосна) составил 400 мин. Рубка велась до затупления режущей кромки ножа или выхода из строя контрножа. По мере затупления ножей

весь комплект демонтировался и подвергался переточке в инструментальном цехе предприятия. Произведено 7 переточек. Результаты испытаний также заносились в протокол испытаний и позволяют рекомендовать к использованию опытные ножи ФТИ5.001.1675 на деревообрабатывающих предприятиях.

Исследования механических свойств ножей для рубительных машин после проведения предварительных испытаний. Из испытанных образцов ножей методом электроэрозионной резки вырезались специальные образцы (рис. 5) с целью изготовления шлифов для металлографических и дюраметрических исследований механических свойств образцов (твердость, ударная вязкость), которые проводились по стандартным методикам [3; 4].



Рисунок 5 – Шлифы из опытных образцов ножей

Известно, что достаточная вязкость в сочетании с достаточно высокой твердостью предупреждает образование сколов (выкрашивания) и трещин. Наряду с определенными внешними факторами на вязкость сталей влияет множество внутренних факторов: химический состав, загрязняющие примесные компоненты, количество и качество включений, степень пластической деформации, величина зерен аустенита, количество, распределение, дисперсность карбидов и других фаз, внутренние напряжения. Это свидетельствует о том, что на вязкость сталей, помимо термообработки, существенно изменяющей структуру, значительное влияние оказывают технология их изготовления, а также способ выплавки и горячего деформирования.

Исследованы механические свойства образцов ножей для рубки щепы (твердость, ударная вязкость) по стандартным методикам (ГОСТ 9013-59, ГОСТ 9454-78). Полученные результаты представлены в таблице.

Механические свойства образцов ножей для рубки щепы

Номер ножа	Твердость, HRC		Ударная вязкость, Дж/см ²	
	до испытаний	после испытаний	до испытаний	после испытаний
ФТИ 5.001.1671	49...55	50...56	12...19	15...23
ФТИ 5.001.1675	50...54	52...56	13...17	16...20

Из таблицы видно, что величины твердости и ударной вязкости опытных образцов ножей после проведения производственных испытаний немного увеличились, что можно объяснить проявлением наклепа вследствие многократных ударных нагрузок.

Износ и затупление дереворежущих ножей в процессе производственных испытаний. Эксперименты проводились согласно разработанной методике. В результате обработки полученных данных были установлены численные значения и зависимости исследуемых величин, изучен характер и величина износа ножей.

Количество обработанного древесного материала (L): 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 погонных метров. Максимальное количество обработанных метров древесного материала выбиралось из предварительно проведенных исследований и рекомендаций. Ножи нумеровались с помощью электрогравировки.

В качестве контролируемых параметров были выбраны: радиус округления режущей кромки, линейный износ, количество обработанного древесного материала в погонных метрах. Измерения радиус-

са износа режущей кромки ножа проводились на инструментальном микроскопе ММИ-2 с радиусной головкой ОГР23; линейный износ – на микроскопе УИМ-23. Начальный радиус округления режущей кромки дереворежущих ножей зависит от тщательности их подготовки. Перед началом испытаний составлял около 5...10 мкм. Угол заострения режущей кромки ножей – от 27 до 40°.

Полученные зависимости износа и затупления характеризуются двумя фазами: приработочной и монотонной. Износ и затупление ножей из стали 6ХВ2С протекают наиболее интенсивно при обработке первых 1000 м. п. (приработанный износ). За этот период радиус округления режущей кромки ножей возрастает для ножей стали 6ХВ2С с 10 до 12...14 мкм. Линейный износ достигает 39 мкм. Изменение данных параметров происходит немонотонно, особенно на начальном этапе работы. В некоторых случаях наблюдаются микрообломы лезвия. Большая интенсивность износа в приработочный период связана с проявлением дефектного состояния прикромочной зоны и значительным напряжением в остро заточенном резце. При воздействии сил резания в этих местах происходит микроаварийный облом сравнительно больших блоков металла. С укорочением лезвия количество циклов нагружения до очередного микрооблома и отделения частицы лезвия увеличивается.

Величина радиуса возрастает на 4...6 мкм в среднем на каждые 1000 м. п. Линейный износ увеличивается при обработке каждых 1000 м. п. на 12 мкм и в конце периода достигает 84...95 мкм (после обработки 6000 м. п. древесного материала).

Анализ результатов проведенных исследований износа и затупления инструмента при обработке древесных материалов позволяют сделать вывод, что основными параметрами износа являются радиус округления и величина линейного укорочения по передней поверхности. Значения этих двух параметров определяют число переточек и величину объема металла, снимаемого при переточке ножа, следовательно эти параметры влияют на энерго- и материалопотребление при подготовке ножа к работе.

Заключение. Из стали 6ХВ2С, поставляемой на белорусский рынок из России, на филиале ЗАО «Атлант» – БСЗ было изготовлено несколько комплектов опытных образцов рубильных ножей, предназначенных для испытаний в производственных условиях на деревообрабатывающих предприятиях республики (ОАО «Минскдрев», ОАО «Ивацевичдрев», ОАО «Витебскдрев», ЗАО «Холдинговая компания «Пинскдрев»)). Производственные испытания всех опытных ножей, изготовленных по технологиям, разработанными в ФТИ НАН Беларуси и БарГУ, показали их соответствие производственным требованиям, а также требованиям ГОСТов, что позволяет рекомендовать такие ножи для широкого внедрения на деревообрабатывающих предприятиях, специализирующихся на производстве технологической щепы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ножи для рубильных машин. Технические условия: ГОСТ 17342-81. – Введ. 11.03.1981. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1983. – 8 с.
2. Щеп технологическая. Технические условия: ГОСТ 15815-83. – Введ. 01.01.1983. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 11 с.
3. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу: ГОСТ 9013-59. – Введ. 01.01.1969. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1989. – 11 с.
4. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах: ГОСТ 9454-78. – Введ. 01.01.1979. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1989. – 9 с.

Поступила 23.06.2015

RESULTS PRODUCTION TEST CHIPPER KNIVES, MANUFACTURED ACCORDING TO THE DEVELOPED TECHNOLOGY

A. ALIFANOV, V. TSURAN, A. MILUKOVA

Set the use of domestic steel grades as a more promising in return import. In the course of the work of steel 6HV2S supplied to the Belarusian market of Russia, made a few sets of prototypes chipper knives, equipm-chennyh test under production conditions in the woodworking factories republics-faces. Production testing of all test blades manufactured in accordance with tehprotses-themselves developed in BarGU, demonstrated their compliance with production requirements and state standards requirements and is recommended for this type of knives for a wide introduction to woodworking enterprises, specializing in the production of wood chips.

Keywords: *chippers, production testing, mechanical properties, geometric parameters, wear, cracks that regrinding.*

УДК 621.729

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО НАНЕСЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

*канд. техн. наук, доц. А.Л. ГОЛОЗУБОВ**(Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина)*

Рассматриваются технологические и конструктивные особенности дугового плазмотрона для нанесения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий осаждением из дуговой плазмы при атмосферном давлении. Проведенный комплекс экспериментальных и конструкторских работ позволил оптимизировать технологию нанесения тонкопленочных покрытий, улучшить качество наносимого покрытия и повысить стабильность процесса за счет использования новых решений, исключающих или значительно ослабляющих проявление негативных процессов внутри плазмотрона.

Ключевые слова: плазмотрон, нанесение покрытий, усовершенствование, качество, стабильность.

Введение. Развитие современного производства напрямую связано с разработкой новых высокоэффективных технологических процессов, позволяющих получать материалы с заданными свойствами.

Нанесение тонкопленочных покрытий (ТП) осаждением из дуговой плазмы при атмосферном давлении – сравнительно новый метод поверхностного упрочнения металлических поверхностей, который обладает рядом несомненных преимуществ перед ранее применявшимися технологиями.

Наиболее перспективным направлением использования ТП является нанесение барьерных покрытий, необходимых для создания на металлических поверхностях защитных пленок с заданными свойствами: износостойкостью, твердостью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Область применения таких покрытий – упрочнение и защита прецизионных поверхностей (посадочных мест, контактирующих поверхностей узлов трения), где точность обработки должна соответствовать высоким kvalitетам. Нанесение износостойких ТП толщиной до 2 мкм из дуговой плазмы позволяет улучшить показатели шероховатости поверхности и повысить ее триботехнические свойства. Высокая точность нанесения ТП по толщине до 0,3 мкм дает возможность применять технологический процесс для упрочнения контактирующих поверхностей прецизионных узлов трения, штамповой оснастки и других деталей, не допускающих последующей механической обработки из-за высоких требований к точности изготовления и сборки.

Процесс нанесения плазмохимических покрытий включает в себя пиролиз кремнийорганических соединений в потоке плазмообразующего газа для получения однородной реакционной плазмы, транспортировку продуктов пиролиза к месту протекания реакции и собственно нанесение покрытия из газовой фазы на подложку. Эффективность работы плазмохимического реактора увеличивается при обеспечении образования гомогенной смеси реагента с плазмообразующим газом. Особенностью плазмохимических процессов является большое количество входных параметров, влияющих на энергетические характеристики плазменной струи (температура, энтальпия, режим и скорость истечения плазмы, энергия заряженных частиц), от которых зависит качество наносимого покрытия и свойства подложки.

Учитывая, что дефектность структуры ТП не снижает их защитных свойств, а в ряде случаев и повышает, в последнее время наметилась тенденция к освоению новых технологий получения ТП, не связанных с вакуумной техникой. Наибольшее внимание исследователей привлекают плазменные технологии, как наиболее эффективные и изученные с точки зрения аппаратного обеспечения. Применение плазменной техники также связано с успехами в области синтеза нового класса веществ – металлоорганических соединений (МОС). Для генерации плазмы в основном используются различные виды высокочастотного (ВЧ) разряда, имеющие, однако, существенные недостатки: наличие вредного излучения, высокая энергоемкость, ограничения по массе и габаритам обрабатываемых деталей, высокая стоимость.

Значительно расширить область применения плазменной технологии нанесения ТП позволяет использование электродуговых плазмотронов. Экологичность, маневренность, низкая стоимость плазмотронов выгодно отличают данную технологию от традиционных методов получения ТП [1].

Анализ конструктивных решений. Разработанный плазмотрон для нанесения плазмохимических покрытий конструктивно состоит из корпуса, водоохлаждаемых торцовых анода и катода, электронной вставки, изолированной от корпуса и анода, вихревой камеры, расположенной соосно на торцовом катоде, имеющей по меньшей мере одно тангенциальное отверстие (рис. 1) [2].

Недостаток разработанного плазмотрона состоит в том, что реагент вводится вместе с плазмообразующим газом в паровой фазе непосредственно в катодную область плазмотрона и вызывает осаждение соединений кремния в виде ультрадисперсного порошка внутри самого плазмотрона, преимущественно

на внутренних поверхностях катодного узла и электронеутральной вставки. В результате уменьшается внутреннее проходное сечение, увеличивается граничное трение по внутренним поверхностям плазмотрона, что способствует турбулизации плазменной струи и снижает качество наносимого покрытия за счет ухудшения защиты зоны осаждения покрытия от влияния атмосферного воздуха. Кроме того, образование внутреннего налета на стенках плазмотрона вызывает необходимость выключения плазмотрона для его очистки, с периодичностью 15...20 минут, что снижает производительность процесса и качество нанесения покрытия и приводит к повышению себестоимости изготовления деталей.

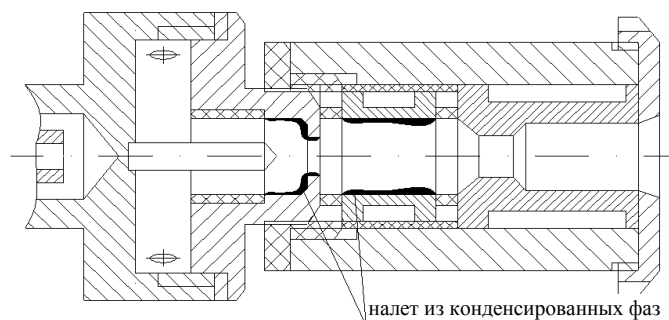


Рисунок 1 – Места образования налета из конденсированных фаз на внутренних поверхностях плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий

Таким образом, задача совершенствования конструкции плазмотрона – повышение качества наносимых покрытий, повышение производительности процесса, снижение себестоимости изготовления деталей и получение за счет этого экономического эффекта, что достигается исключением образования налета на внутренних поверхностях катодного узла и электронеутральной вставки.

Анализ конструктивных решений плазмотрона позволил выделить отдельные детали плазмотрона, изменение конструкций которых позволит достичь требуемых результатов с наименьшими затратами и без существенной переделки плазмотрона в целом.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что для снижения или исключения количества конденсированного налета на внутренние стенки плазмотрона наиболее эффективный метод – уменьшение пути прохождения (и соответственно времени нахождения) парообразного реагента в реакционной плазме. Лимитирующим фактором в этом случае является время нахождения реагента в реакционной плазме, имеющей достаточную температуру.

Рассматривая конструкцию плазмотрона с точки зрения минимизации затрат на модернизацию, выделено два возможных варианта:

- 1) подача реагента в область электронеутральной вставки;
- 2) подача реагента в область анода.

Первый вариант сопряжен с техническими трудностями реализации – малой толщиной стенок электронеутральной вставки и наличием диэлектрической втулки между ней и корпусом плазмотрона, что делает реализацию этого варианта нецелесообразной.

Второй вариант не вызывает технических трудностей в реализации, а проведенные эксперименты показали, что в данном варианте время пребывания реагента в плазме будет достаточным для протекания пиролиза реагента и получения реакционноспособной плазмы с необходимыми характеристиками.

С учетом вышесказанного разработана новая конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий. На рисунке 2 показана разработанная конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий.

Конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий представляет собой деталь цилиндрической формы, имеющую входную коническую поверхность 1, служащую для зажигания дуги плазмотрона, внутренний коаксиальный канал 2, служащий для стабилизации плазменной струи и имеющий проходные отверстия 3, служащие для подачи газа-носителя, насыщенного парами реагента, наружный коаксиальный канал 4, большего диаметра для ламинаризации плазменной струи.

При этом ввод реагента в паровой фазе осуществляется отдельно с плазмообразующим газом и происходит не в катодной области плазмотрона, а в его аноде через отверстия, по которым насыщенный парами реагента газ-носитель (например, аргон) поступает в реакционную плазму. Место ввода транспортирующего газа, насыщенного парами реагента, должно отстоять от наружного среза сопла плазмотрона на расстоянии, достаточном для протекания реакции пиролиза реагента в плазменной струе и гомогенизации ее состава. Это расстояние зависит от внутреннего диаметра анода плазмотрона, давления и

расхода плазмообразующего газа, силы тока дуги плазмотрона, расхода газа-носителя и степени насыщенности его парами реагента, должно обеспечивать ламинарный режим истечения плазменной струи и в общем случае для конкретной модели плазмотрона определяется экспериментально.

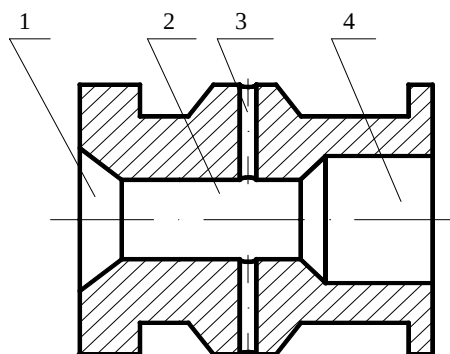
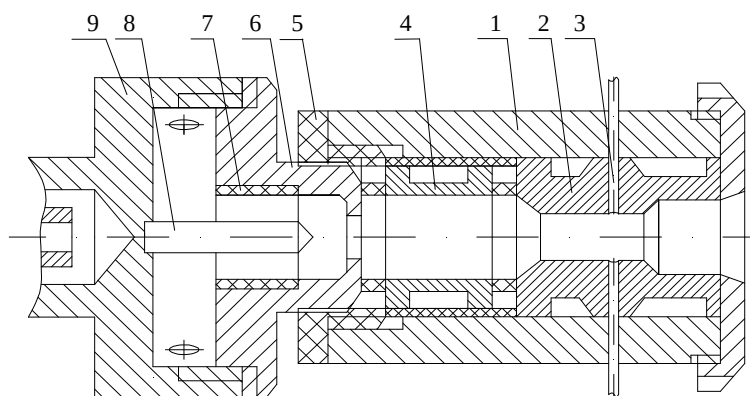


Рисунок 2 – Конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий [4]

Разработанная конструкция анода плазмотрона (см. рис. 2) для плазмохимического нанесения покрытий работает следующим образом. Транспортирующий газ, насыщенный парами реагента, поступает по отверстиям 3 во внутренний коаксиальный канал 2, по которому движется плазменная струя, смешивается с ней, в результате чего происходит пиролиз паров реагента и образование реакционноспособной плазменной струи, благодаря чему исключается образование налета на внутренних поверхностях катодного узла и электронной вставки, расположенных до анода плазмотрона (рис. 3), и, соответственно, обеспечивается более высокая производительность плазмотрона и более высокое качество наносимого покрытия. Кроме указанного, внутренний коаксиальный канал 2 имеет меньший диаметр, чем электронейтральная вставка и наружный коаксиальный канал 4, поэтому в нем плазменная струя имеет более высокую скорость, что способствует более интенсивному перемешиванию плазменной струи с транспортирующим газом, насыщенным парами реагента, в результате чего состав реакционной плазмы гомогенизируется более интенсивно.



**1 – корпус; 2 – сопло; 3 – канал ввода транспортирующего газа реагента;
4 – электронейтральная вставка; 5 – изолирующая втулка; 6 – вспомогательное сопло;
7 – изолирующая втулка; 8 – катод; 9 – вихревая камера**

Рисунок 3 – Конструкция плазмотрона для нанесения плазмохимических покрытий

В ходе экспериментальных исследований выяснилось, что разработанная конструкция анода плазмотрона не лишена недостатков. Недостатком разработанной ранее конструкции анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий, является постепенное засорение проходных отверстий для подачи паров реагента ультрадисперсным порошком за счет конденсации продуктов пиролиза реагента по краям отверстия канала ввода транспортирующего газа. Данное явление обусловлено газодинамическим воздействием плазменной струи, попадающей в проходные отверстия для подачи паров реагента и создающей дополнительное сопротивление их движению. Кроме того, она создает зоны, в которых происходит процесс пиролиза реагента и обратный процесс конденсации продуктов пиролиза, так как внут-

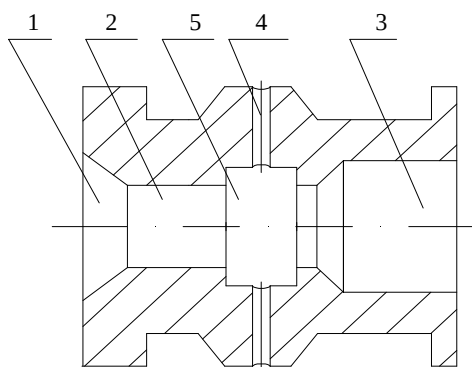
ренные поверхности отверстий для подачи паров реагента по мере удаления от внутреннего коаксиального плазменного канала имеют значительно меньшую температуру за счет принудительного охлаждения наружной поверхности анода водой.

Засорение отверстий для подачи паров реагента уменьшает размер их проходных сечений и вызывает снижение концентрации реагентов в плазменной струе. Снижение концентрации реагентов в плазменной струе приводит к уменьшению скорости осаждения покрытия, а также перегреву подложки, за счет чего снижается качество наносимого покрытия и увеличивается время обработки.

Следующая задача совершенствования конструкции анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий заключалась в определении увеличения времени безостановочной работы плазмотрона и улучшении качества наносимых покрытий за счет повышения стабильности процесса путем создания условий, обеспечивающих поддержание заданной концентрации реагентов в плазменной струе.

Для решения поставленной задачи в конструкцию анода плазмотрона были внесены изменения. Новая конструкция анода плазмотрона (рис. 4) отличается от ранее разработанной тем, что внутренний канал стабилизации плазменной струи, имеющий проходные отверстия для подачи паров реагента, дополнительно снабжен кольцевой выточкой в месте входа в него проходных отверстий для подачи паров реагента [5]. При этом снижается газодинамическое воздействие плазменной струи на процесс ввода паров реагента и тем самым исключается засорение проходных отверстий для подачи паров реагента за счет конденсации ультрадисперсного порошка в виде соединений кремния из продуктов пиролиза реагента.

Экспериментальные исследования показали, что место ввода транспортирующего газа, насыщенного парами реагента, должно отстоять от стенки внутреннего канала стабилизации плазменной струи плазмотрона на расстоянии не менее 1–2 диаметров проходных отверстий для подачи паров реагента.



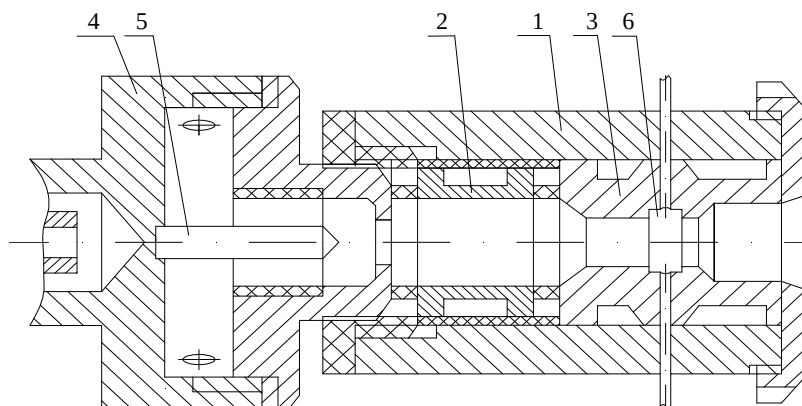
1 – входная коническая поверхность; 2 – внутренний коаксиальный канал;
3 – наружный коаксиальный канал; 4 – проходные отверстия
для подачи транспортирующего газа; 5 – кольцевая выточка

Рисунок 4 – Анод плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий [4]

Усовершенствованный анод плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий (см. рис. 4) работает следующим образом. Транспортирующий газ, насыщенный парами реагента, поступает по отверстиям 3 в кольцевую выточку внутреннего коаксиального канала 2, по которому движется плазменная струя, смешивается с ней, в результате чего происходит пиролиз паров реагента и образование реакционно-способной плазменной струи. При этом исключается образование налета из ультрадисперсного порошка путем конденсации продуктов пиролиза реагента на внутренних поверхностях проходных отверстий для подачи паров реагента, за счет чего обеспечивается более высокая производительность плазмотрона и более высокое качество наносимого покрытия. Кроме того, наличие кольцевой выточки во внутреннем коаксиальном канале способствует более равномерному вводу реагента в плазменную струю, в результате чего состав реакционной плазмы гомогенизируется быстрее. Усовершенствованный анод плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий не требует значительного усложнения технологии изготовления.

Обсуждение результатов исследований. Проведенные экспериментальные исследования показали, что повышение качества наносимого ТП и улучшение эксплуатационных характеристик плазмотрона для нанесения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий осаждением из дуговой плазмы при атмосферном давлении можно обеспечить путем применения новых конструктивных решений, не требующих кардинальных изменений в конструкции плазмотрона. Экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективным направлением улучшения эксплуатационных характеристик плазмотрона является уменьшение пути и времени нахождения реагента в плазменной струе за счет изменения места ввода реагента в плазму. Особенности протекания газодинамических процессов в аноде

плазмотрона привели к необходимости совершенствования его конструкции путем изменения геометрии внутренней поверхности (рис. 5).



1 – корпус; 2 – электронейтральная вставка; 3 – сопло;
4 – вихревая камера; 5 – катод; 6 – кольцевая выточка

**Рисунок 5 – Усовершенствованная конструкция плазмотрона
для нанесения плазмохимических покрытий**

Закключение. Проведенный комплекс экспериментальных и конструкторских работ позволил оптимизировать технологию нанесения тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий осаждением из дуговой плазмы при атмосферном давлении, улучшить качество наносимого покрытия и повысить стабильность процесса за счет использования новых конструктивных решений, исключающих или значительно ослабляющих проявление негативных процессов внутри плазмотрона. Принятые конструктивные решения существенно не изменили конструкцию плазмотрона в целом и не привели к значительным дополнительным затратам, что положительно сказалось на конкурентоспособности технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голозубов, А.Л. Теоретические и технологические аспекты осаждения защитных тонкопленочных кремнийсодержащих покрытий из дуговой низкотемпературной плазмы при атмосферном давлении / А.Л. Голозубов. – Мозырь: Белый ветер, 2012. – 218 с.
2. Плазмотрон для плазмохимического нанесения покрытий: пат. 2306 Респ. Беларусь, С1 ВУ, МКИ6 Н 05Н 1/26 / А.Л. Голозубов, Э.М. Пархимович, О.В. Иванина, А.Р. Андреев. – № 950023; заявл. 10.01.1995; опубл. 16.03.1998 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 1998. – № 3. – С. 222.
3. Конструкция анода плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий: пат. 7362 Респ. Беларусь, МПК Н05Н 1/26 (2006.01) / А.Л. Голозубов, А.М. Старовойтов, А.А. Голозубова; заявитель УО «МГПУ им. И.П. Шамякина». – № и 20100984; опубл. 2011.06.30 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2011. – № 3.
4. Анод плазмотрона для плазмохимического нанесения покрытий: пат. 8893 Респ. Беларусь, МПК Н05Н 1/26 (2006.01) / А.Л. Голозубов, А.А. Голозубова; Д.А. Ворончук; Ю.Н. Купрацевич; заявитель УО «МГПУ им. И.П. Шамякина». – № и 20120452; опубл. 2012.12.30 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2012. – № 6.

Поступила 14.12.2015

PERFECTION OF DESIGN PLASMA GENERATOR FOR PLASMA CHEMICAL DRAWING OF THIN-FILM COVERINGS

A. GOLOZUBOV

Are considered technological and design features arc plasma generator for drawing of thin-film siliceous coverings by sedimentation from arc plasma at atmospheric pressure. The spent complex of experimental and design works has allowed to optimise technology of drawing of thin-film coverings, to improve quality of a put covering and to raise stability of process at the expense of use of the new decisions excluding or negative processes considerably weakening display inside plasma generator.

Keywords: plasma generator, drawing of coverings, development, quality, stability.

УДК 621.926

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ С МЕШАЛКОЙ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

В.И. КОЗЛОВСКИЙ; д-р техн. наук, проф. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Исследуется процесс помола материалов в шаровой мельнице с мешалкой непрерывного действия. Проанализированы характеристики крупности распределения размера частиц. Построены графические зависимости эффективности диспергирования от скорости вращения мешалки и движения суспензии. Предложен метод предварительной оценки и оптимизации энергозатрат на диспергирование.

Ключевые слова: измельчение, шаровая мельница с мешалкой, характеристика крупности распределения размера частиц, эффективность, энергозатраты.

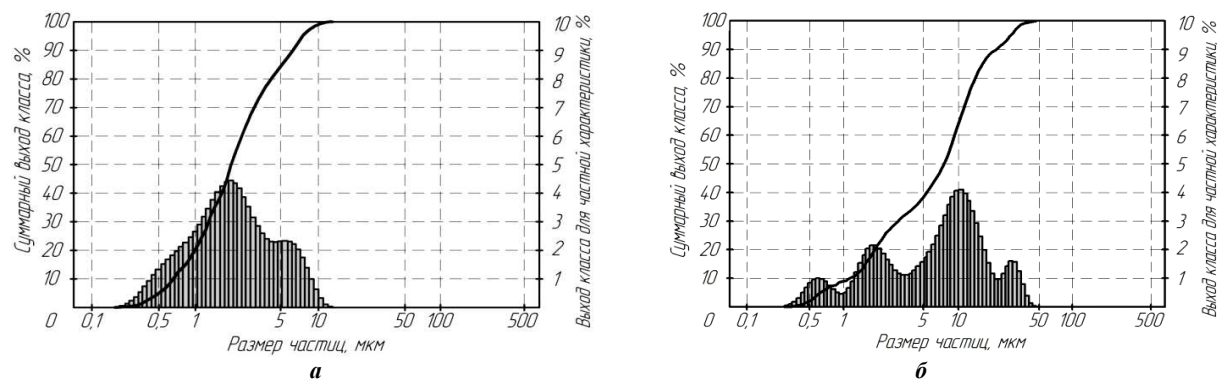
Введение. В составе практически всех композиционных материалов различного назначения широко используются наполнители – самые разнообразные по химическому составу и происхождению природные и искусственные материалы, вводимые в композиционные составы, в первую очередь для удешевления или придания им определенных эксплуатационных свойств. Функции наполнителей, вводимых в композиционный материал, разнообразны. Они могут вызывать упрочнение материала, оказывать армирующий, бронирующий, абразивный, уплотняющий, разбавляющий, стабилизирующий и другие эффекты. Наиболее широко применяются такие природные и органические наполнители, как мел, каолин, известняк, тальк, доломит, барит, диатомит, пробковая и древесная мука, белая сажа (гидратированный диоксид кремния), асбесты и др. Основным требованием к наполнителям независимо от происхождения является то, что они применяются в виде тонкодисперсных порошков или суспензий и что степень дисперсности для них – одно из важнейших свойств. Для получения тонкодисперсных суспензий сегодня используются шаровые мельницы с мешалками, причем преимущественно горизонтального типа [1–2].

Авторы данной работы продолжительное время занимаются исследованиями подобных агрегатов, начало которым положило изучение кинетики измельчения различных материалов при циклическом режиме. Установлено, что исходный продукт за несколько минут может быть доведен до долей микрометра. Методика проведения этих исследований и их основные результаты подробно описаны в публикациях [3–5].

Основная часть. Изучение основных характеристик мельницы с мешалками при непрерывной подаче исходного продукта и удалении готового с одновременной его циркуляцией по внешнему контуру – стало следующим этапом исследований. Причем на этом этапе были максимально сохранены технологические и конструктивные параметры объекта исследования. В качестве измельчающих тел использовались чугунные шарики диаметром 1 и 3 мм, которые заполняли рабочую камеру на 80...90%. При проведении экспериментов изменяли частоту вращения вала с мешалками от 1100 до 1500 об/мин, что соответствовало линейной скорости по кромкам мешалок от 8,5 до 10,6 м/с.

Отличительная особенность данной части работы – варьирование подачи исходного продукта, обеспечивающее изменение скорости суспензии на полное сечение мельницы в пределах 0,097...0,226 м/с.

Измельчению подвергались мел, каолин и белая сажа с размером частиц 0,2...3 мм. Анализ проб проводился на лазерном микроанализаторе фирмы «Fritsch» при помощи измерительного комплекса «Analysette 22», который выдает результаты в виде характеристик крупности распределения размеров частиц в объеме пробы. Две такие характеристики для каолина, полученные при одинаковой скорости движения рабочего органа (мешалки) $u = 10,6$ м/с (диаметр шаров 1 мм) на разных скоростях движения суспензии, представлены на рисунке 1.



а – скорость подачи суспензии 0,097 м/с; **б** – скорость подачи суспензии 0,226 м/с

Рисунок 1 – Распределение размеров частиц в объеме пробы каолина при скорости вращения мешалки 10,6 м/с

Из рисунка 1 видно, что увеличение скорости движения суспензии приводит к загрузлению конечного продукта. Это происходит по двум причинам: во-первых, сокращается время пребывания материала в зоне помола, во-вторых, из-за увеличения скорости движения суспензии между пальцами сепаратора успевают проскочить частички большего размера.

Оценивать по характеристикам крупности влияние различных факторов на эффективность диспергирования довольно трудно. Поэтому мы перешли к параметру $E = 100 - R$, где R – доля конечного продукта размером более 10 мкм, как и в циклическом режиме. В результате большая часть экспериментального материала представлена в виде функциональных зависимостей $E = f(x_i)$, где x_i – изменяемый параметр.

Изменение эффективности диспергирования в зависимости от скорости подачи v суспензии (диаметр шаров 1 мм) показано на рисунке 2.

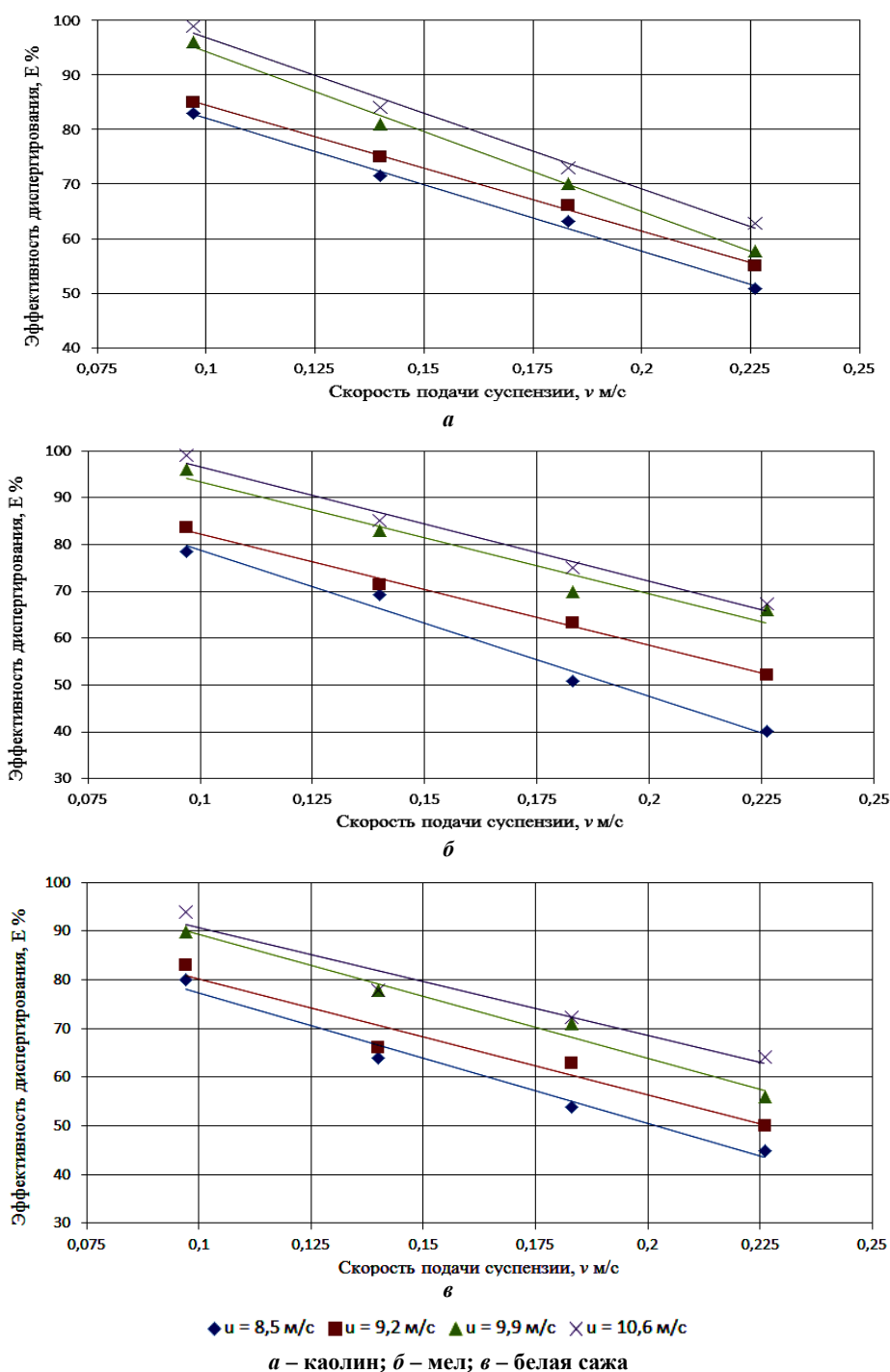


Рисунок 2 – Зависимость эффективности диспергирования от скорости подачи суспензии (диаметр мелющих тел 1 мм)

Для всех измельчаемых материалов с увеличением скорости подачи суспензии, а соответственно, и производительности эффективность измельчения уменьшается, причем довольно существенно. Причины такого уменьшения указаны при анализе характеристик крупности (см. рис. 1). Вместе с тем повышение скорости вращения мешалок обеспечивает более высокую эффективность и ее падение не столь чувствительно. Например, для каолина (рис. 3) при изменении скорости мешалок от 8,5 до 10,6 м/с эффективность измельчения увеличивается на 15%. Пробные опыты для того же каолина с диаметром мелющих тел 3 мм показали аналогичные закономерности изменения эффективности, что и с диаметром 1 мм. Однако, как и в циклическом режиме, ее значения примерно на 10% ниже (рис. 4).

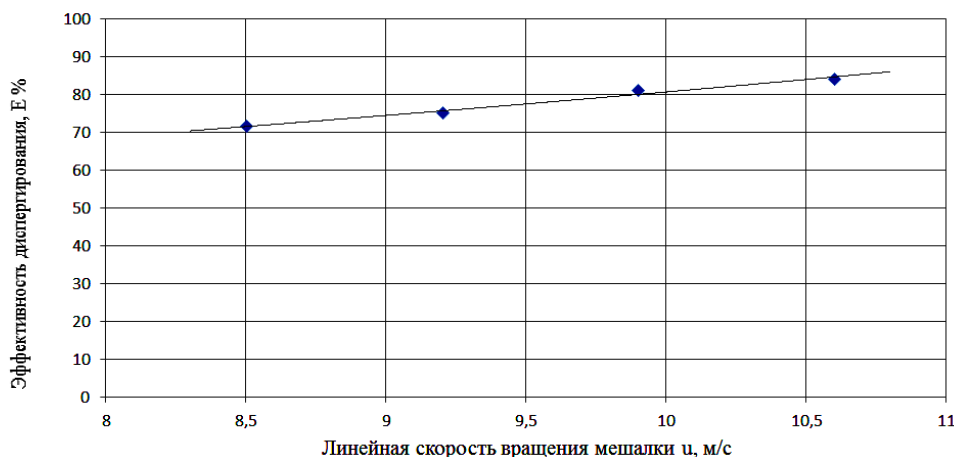


Рисунок 3 – Зависимость эффективности диспергирования от скорости вращения мешалки при $v = 0,097$ м/с

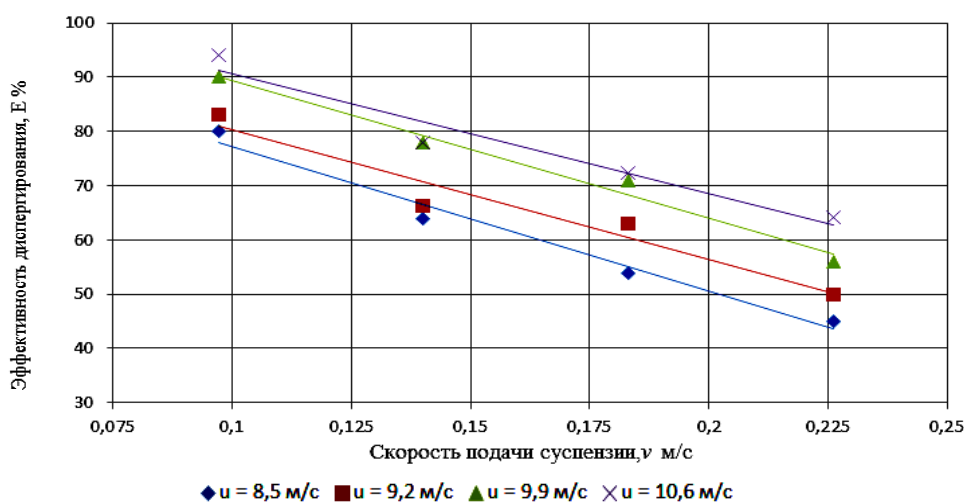


Рисунок 4 – Зависимость эффективности диспергирования от скорости движения суспензии для каолина (диаметр мелющих тел 3 мм)

Обработка экспериментальных данных с учетом зависимости эффективности измельчения от двух переменных дала возможность получить расчетные эмпирические формулы (1) для каждого исследуемого материала:

$$\begin{aligned}
 &\text{- каолин} & E_k &= \frac{u}{0,186 \cdot u \cdot v^{2,1} - 0,5273v^2 + 0,1473v + 0,083}; \\
 &\text{- мел} & E_m &= \frac{u}{141,25 \cdot u \cdot v^{5,6} + 23,54v^2 - 4,9719v + 0,3773}; \\
 &\text{- белая сажа} & E_{б.с} &= \frac{u}{87,1 \cdot u \cdot v^{3,88} + 10,032v^2 + 0,8563v + 0,0924},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где u – скорость движения рабочего органа мешалки; v – скорость подачи суспензии.

Полученные экспериментальные зависимости и расчетные уравнения, связывающие три параметра, могут быть использованы для предварительной оценки и оптимизации энергозатрат на диспергирование материала. В общем случае энергия затрачивается на приведение в движение рабочего органа (вала с мешалкой) и подачу суспензии насосом. Энергетическим показателем при этом является мощность привода мельницы и насоса. Для любой механической системы эта мощность рассчитывается по формуле

$$N_m = F \cdot u, \quad (2)$$

где F – движущая сила.

Движущая сила должна быть больше силы сопротивления среды, в которой вращаются мешалки. Эта сила рассчитывается как

$$F = c \cdot \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot S, \quad (3)$$

где c – коэффициент гидравлического сопротивления среды; ρ – плотность среды; S – активная площадь мешалки.

Таким образом, если принять фиксированными все параметры, кроме скорости, и обозначить их, например, A , то получим

$$N_m = A \cdot u^3, \quad (4)$$

Мощность насоса, необходимая для перемещения суспензии в мельнице:

$$N_n = p \cdot Q, \quad (5)$$

где p – давление, развиваемое насосом; Q – расход суспензии.

Но давление должно превышать гидравлическое сопротивление системы, которое определяется по формуле Вейсбаха:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho \cdot u^2}{2} \cdot S, \quad (6)$$

где ζ – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления системы.

Проведя преобразования, аналогичные с приводом мешалок, и введя еще один обобщающий параметр, получим

$$N_n = B \cdot v^3. \quad (7)$$

Таким образом, мы получили кубическую зависимость обеих составляющих энергетических затрат от скоростей движения мешалок и обрабатываемой суспензии соответственно.

Для удобства дальнейших рассуждений обозначим: $u^3 = U$; $v^3 = V$.

Следующий этап исследований заключался в построении диаграмм. Строилась координатная сетка, по горизонтальной оси откладывались экспериментальные значения эффективности диспергирования. По одной из вертикальных осей откладывались расчетные значения параметра U , а по другой – V . Поскольку эти параметры эквивалентны затрачиваемой мощности, то, соединив расчетные значения, обозначенные точками, плавными кривыми, получим диаграммы, связывающие эффективность диспергирования с энергозатратами (рис. 5). Пересечение любых двух кривых, характеризующих изменение U или V , дают точку с максимально возможной эффективностью диспергирования при минимальных суммарных энергозатратах. По координатам точки пересечения легко можно определить скорости мешалок $\sqrt[3]{U}$ и движения суспензии $\sqrt[3]{V}$, при которых обеспечивается этот максимум.

Закключение. Результатом исследования измельчения материалов в шаровой мельнице с мешалкой непрерывного действия являются характеристики крупности распределения размера частиц, по которым можно определить выход любого класса крупности.

Анализ изменения эффективности диспергирования в зависимости от скоростей вращения мешалки и движения суспензии позволил получить расчетные эмпирические формулы для разных материалов, которые связывают эти три параметра.

Предложен метод предварительной оценки и оптимизации энергозатрат на диспергирование, который можно использовать на стадии экспериментальных исследований. Установлено, что суммарные энергозатраты пропорциональны скоростям мешалок и суспензии в третьей степени. В качестве целевой функции при оптимизации выбрана эффективность измельчения, а оптимизирующих критериев – анало-

ги указанных скоростей. В результате оптимизации можно определить максимально возможную эффективность при минимальных энергозатратах.

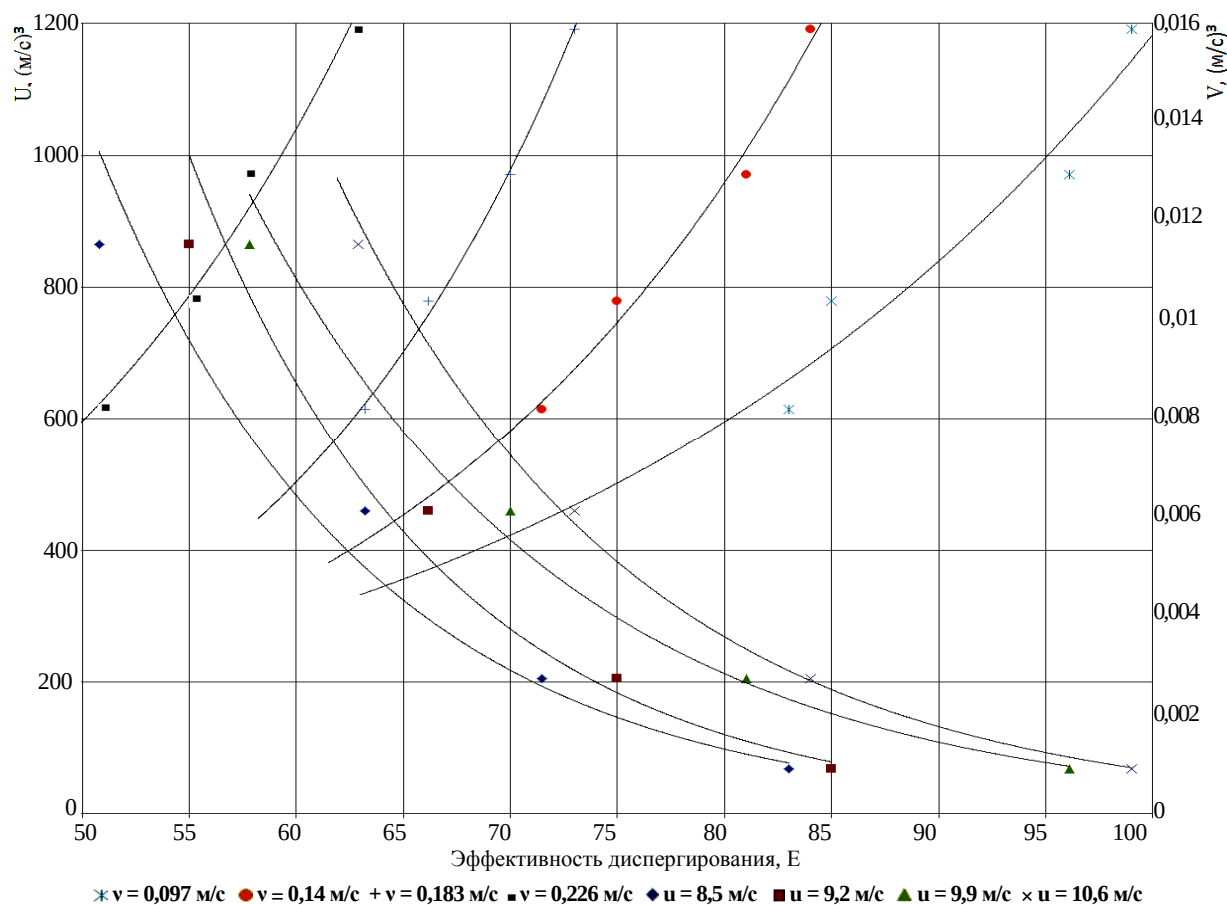


Рисунок 5 – Диаграмма для определения энергозатрат

ЛИТЕРАТУРА

1. Joost, B. Einfluß vor Mahlkörper Eigenschaften auf die Zerkleinerung in Rührwerkskugelmöhlen / B. Joost, J. Schwedes // Chem. – Ing. Techn. – 1996. – Jhrg. 68, № 7. – S. 809–812.
2. Кухтин, И.В. Усовершенствование диспергирующего оборудования для производства лакокрасочной продукции / И.В. Кухтин, В.Н. Ратников // Лакокрасочные материалы и их применение. – М., 2004. – № 1–2.
3. Козловский, В.И. Измельчение материалов в шаровой мельнице с мешалкой / В.И. Козловский, П.Е. Вайтехович // Тр. БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганических веществ. – 2012. – Вып. III. – 200 с.
4. Козловский, В.И. Анализ дисперсности продуктов в шаровой мельнице с мешалкой / В.И. Козловский, А.М. Волк, П.Е. Вайтехович // Журнал прикладной химии. – 2012. – Т. 85, вып. 11. – С. 1895–1898.
5. Интенсивность шарового измельчения в быстроходных мельницах / П.Е. Вайтехович [и др.] // Химическая промышленность сегодня. – 2012. – Вып. 9. – С. 46–52.

Поступила 27.01.2016

GRINDING OF MATERIALS IN THE BALL MILL WITH THE MIXER OF CONTINUOUSLY WORKING

V. KOZLOVSKY, P. VAJTEHOVICH

In this paper we observe the results of the grinding of materials in the ball mill with a mixer of continuous working. The characteristics of distribution of fragmentation size are analysed, and the graphical dependences of dispersion efficiency on the speed of the mixer rotation and suspension traffic are built. We offer the method of a preliminary estimate and the optimisation of dispersion power inputs.

Keywords: grinding, ball mill with a mixer, characteristics of distribution of fragmentation size, efficiency, power inputs.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.793

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ НАНОРАЗМЕРНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ

д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; И.А. СОСНОВСКИЙ; А.А. КУРИЛЕНКО
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);

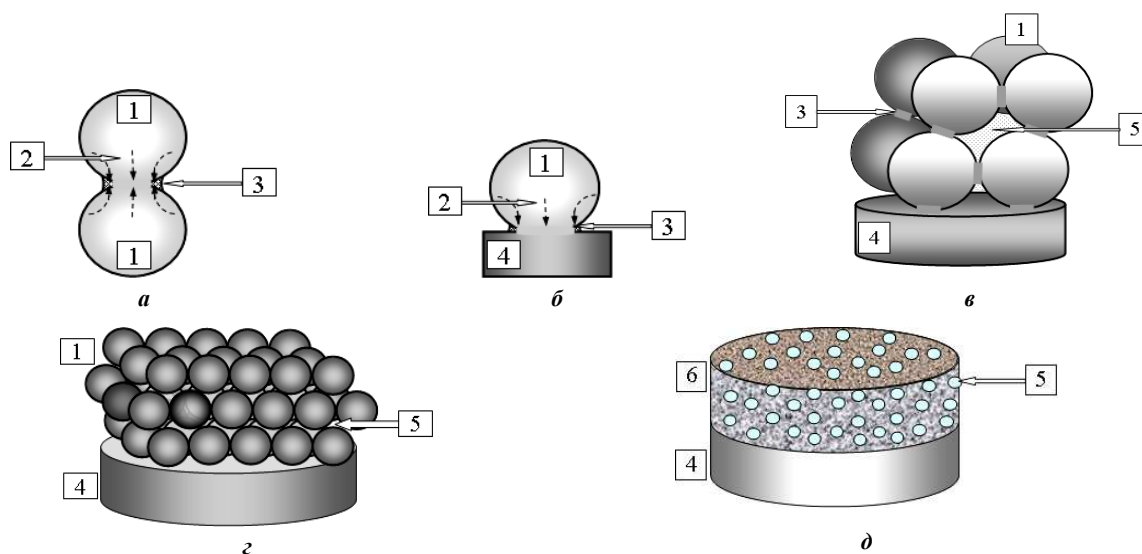
О.О. КУЗНЕЧИК
(Институт порошковой металлургии, Минск)

Исследуется процесс индукционной наплавки порошковых материалов. Разработана математическая модель процессов индукционной наплавки порошковых материалов в исходном состоянии дисперсно-порошковой среды и содержащих в своем составе частицы упрочняющей фазы, представленной ультрадисперсными, либо наноразмерными включениями тугоплавких оксидов или карбидов. Описаны результаты моделирования формирования контактных промежутков между частицами дисперсной фазы при упругом сжатии и влияние этого промежутка на характер перехода дисперсно-порошковой среды в твердотельное состояние. С помощью этой модели открывается возможность подбирать режимы, при которых в условиях действия центробежных сил перераспределение частиц упрочняющей фазы и наноразмерных частиц в расплаве будет минимальным.

Ключевые слова: порошковая шихта, антифрикционные покрытия, центробежная индукционная наплавка, математическая модель, наноразмерные компоненты,

Анализ метода индукционной наплавки порошковыми материалами износостойких и антифрикционных покрытий. В машиностроении уделяется постоянное внимание развитию и совершенствованию технологий по получению деталей узлов трения и сопряжения, которые могут работать в условиях повышенных удельных механических и тепловых нагрузок, в том числе при ограниченной смазке или ее полном отсутствии, включая абразивный износ [1–4]. В конструктивном отношении они, как правило, представляют стальную основу с нанесенным антифрикционным и износостойким покрытием. При производстве высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжения учитываются перспективы применения исходных материалов, имеющегося на производстве технологического оборудования, степень его универсальности и распространенности, а также возможность модернизации и тенденции развития. Исходя из этого, начиная с шестидесятых годов прошлого столетия, на предприятиях машиностроения активно применяют, модернизируют и совершенствуют технологическое оборудование, которое обеспечивает получение высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжения методами газопламенной, плазменной, электродуговой, лазерной, индукционной и электроконтактной наплавки [4–15]. При этом в качестве исходных материалов предпочитают использовать порошковые, композиционный состав которых придает получаемым покрытиям износостойкие и антифрикционные свойства. Основу таких материалов составляют металлические порошки с частицами округлой формы, дополненные неметаллическими включениями, например, в виде корунда, играющего роль наноразмерного дисперсного модификатора. Если из существующих групп высоконагруженных деталей узлов трения и сопротивления выделить подшипники скольжения и им подобные детали, то из числа перечисленных методов их получения по показателю наименьшей энергоемкости наиболее перспективным является индукционная наплавка. Это обусловлено широким применением в сварочном и ремонтном производстве установок индукционного нагрева [8–12], имеющих мощность свыше 10 кВт и обеспечивающих достаточно высокие (1...100 К/с) скорости индукционного нагрева. Совершенствованию и развитию перспективных технологий индукционной наплавки может способствовать разработка модели, позволяющей определять необходимые режимы этого процесса с учетом химического состава исходного порошкового материала. Решение данной задачи и является целью настоящей работы. Для ее достижения введем следующие модельные допущения.

Из анализа работ [8–13] следует, что индукционную наплавку порошковых материалов, в том числе и с нанодисперсными модификаторами, можно представить как переход в условиях внешнего воздействия дисперсно-порошковой среды (ДПС) в твердотельное состояние, стадии которого представлены на рисунке 1. При этом оказываемое индукционным нагревом внешнее воздействие может сводиться либо к разновидности спекания под давлением [10; 12; 16], либо сварки давлением [9; 11; 17]. Причем начальное давление в ДПС может создаваться за счет действия центробежных сил. Величина этого давления на начальной стадии спекания вызывает лишь упругое сжатие частиц порошка.



а – зона контакта двух частиц; *б* – зона контакта частицы с основой;
в – порошковый материал на начальной стадии формирования;
г – элементарная ячейка пористого порошкового материала;
 1 – порошковая частица; 2 – направление переноса материала порошковой частицы;
 3 – контактная зона; 4 – основа; 5 – пора; 6 – порошковый материал

Рисунок 1 – Стадии перехода в твердотельное состояние дисперсно-порошковых сред при формировании покрытий

В отношении индукционной наплавки эти подходы характеризуются такими недостатками, как:

- отсутствие учета влияния на модуль упругости материала частиц порошка и формирование контактных зон этих частиц сил электростатического взаимодействия между атомами, как тех, что находятся в узлах кристаллической решетки, так и тех, что вместе с электронами внешней оболочки составляют двойной электрический слой [17] на стадии упругого сжатия;

- отсутствие определения усадки порошкового материала при появлении жидкой фазы в зонах контактирующих поверхностей частиц;

- использование в описании процесса контактообразования менее точных усредненных значений температуры, рассчитываемой исходя из теплового воздействия квазипостоянного тока на материал частицы порошка.

Учтем это при моделировании процессов индукционной наплавки порошковых материалов.

Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых материалов. Известно [3; 10; 11; 16; 17], что в состоянии свободной насыпки или упругого сжатия ДПС представляет композиционную систему, состоящую из дисперсной и дисперсионной фазы. При этом первая включает в себя твердотельные частицы (далее – частицы), а вторая – окружающие их пустоты, которые могут заполняться газом, смесью газов, а в естественных условиях – воздухом с давлением порядка 100 кПа. По границам раздела фаз, а также в зонах соприкосновения частиц дисперсной фазы межфазная поверхность имеет множество локальных искривлений, что делает ее развитой. Вследствие этого в зонах соприкосновения частиц возникают градиенты избыточных давлений и концентраций атомов с максимумами, лежащими в центрах контактных пятен частиц дисперсной фазы. Тем не менее в естественных условиях и при упругом сжатии у большинства частиц дисперсной фазы крупной, средней, мелкой и даже тонкой фракции, способствующем переходу ДПС в твердотельное состояние, не наблюдается.

В естественных условиях на поверхности твердых тел имеется прочный двойной электрический слой [17]. Его появление обусловлено электродинамическим взаимодействием атомов кристаллических решеток поверхностей, в том числе и контактных пятен, а также электродинамическим взаимодействием между ядрами атомов и валентными электронами. В зависимости от типа взаимодействия (ковалентного, ковалентно-полярного, ионного или металлического) поверхностный потенциал двойного электрического слоя может быть либо отрицательным (например, у чистых металлов), либо положительным (например, у оксидов). В состоянии свободной насыпки или упругого сжатия, приводящего к сближению контактных зон на расстояния ближе, чем $10^{-9} \dots 10^{-7}$ м, в которых из-за сил отталкивания кулоновского типа формируется расклинивающее давление, способствующее появлению между контактными пятнами межчастичного зазора.

Для количественного описания вышеизложенных допущений учтем механизм отталкивания контактных пятен, имеющих поверхностный заряд одного знака, а также гипотезу о несплошности твердого тела. При этом будем полагать, что пока межчастичный зазор превышает период кристаллической решетки, расклинивающее давление совпадает с контактным. Расклинивающее давление p можно определить исходя из величин поверхностного заряда q_2 двойного электрического слоя одного контактного пятна, поверхностного потенциала ϕ_1 двойного электрического слоя другого контактного пятна, их площади S_k и межчастичного зазора l_n :

$$p = -\frac{q_2}{S_k} \cdot \frac{\partial \phi_1}{\partial l_n}. \quad (1)$$

При усилиях сжатия ДПС, обеспечивающих сближение контактных пятен на расстояние, сопоставимое с периодом кристаллической решетки, происходит их сращивание из-за перекрытия внешних электронных оболочек атомов (молекул), находящихся в узлах кристаллических решеток. При сращивании расклинивающее давление перестает существовать.

Учитывая модуль упругости металлов, используемых при индукционной наплавке антифрикционных и износостойких покрытий, следует ожидать, что размеры контактных пятен в состоянии свободной насыпки или упругого сжатия частиц дисперсной фазы будет не менее чем на два-три порядка меньше их линейных размеров. Поэтому для частиц дисперсной фазы крупной, средней и тонкой фракции размеры контактных пятен будут лежать в определенных ($10^{-7} \dots 10^{-5}$ м) пределах, позволяющих при рассмотрении влияния сил отталкивания кулоновского типа на расклинивающее давление использовать переход от гипотезы сплошности к учету межатомных сил взаимодействия в кристаллической решетке. Возможность такого перехода обосновывается электростатической природой модуля упругости E_M твердых тел, связанной с действием сил кулоновского взаимодействия атомов, исходя из их размеров r_0 , теплоемкости c_A в постоянном объеме и периода кристаллической решетки a_0 . Преобразование этой зависимости с учетом возможного полиморфизма кристаллических решеток позволяет представить E_M как некоторую функцию, зависящую не только от таких параметров, как a_0 , r_0 , но и от валентности атомов z_e и температуры T :

$$E_M(T) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{z_e e}{r_0 a_0 \beta_i} \right)^2 \left(1 - \frac{T}{T_A - T} \right)^2, \quad (2)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума ($\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); e – элементарный заряд составляющий $1,6 \cdot 10^{-16}$ Кл; β_i – плотность упаковки, связанная с типом кристаллической решетки; $T_A = \frac{(z_e e)^2}{\pi \epsilon_0 a_0 c_A}$.

Используя переход от гипотезы сплошности к межатомному взаимодействию, выражение (1) можно также преобразовать в подобную с (2) устанавливающую связь между l_n с такими параметрами, как p , z_e , r_0 и n_{sk} (поверхностной концентрацией):

$$l_n(p) = 2z_e \phi_e r_0 \sqrt{\frac{\pi \epsilon \epsilon_0 n_{sk}}{p}}, \quad (3)$$

где ϕ_e – электрический потенциал валентного электрона; ϵ – электрическая проницаемость поверхностного слоя.

Согласно квантовомеханическим представлениям о строении и проводимости твердых веществ межчастичный зазор (рис. 2) является определенным барьером для перехода электронов или атомов с одного контактного пятна на другое. Если такой барьер считать прямоугольным, то его проницаемость (D_b) оценивается по энергии связи ΔW_i электронов и атомов (молекул) с поверхностным слоем контактных пятен:

$$D_b(p) = \exp \left(-\frac{4\pi l_n(p)}{h_p} \sqrt{2m_i \Delta W_i} \right), \quad (4)$$

где h_p – постоянная Планка; m_i – масса электрона или атома (молекулы); ΔW_i определяется как

$$\Delta W_i = W_{0i} - W_a. \quad (5)$$

Здесь W_{0i} – глубина потенциальной ямы; W_a – энергия активации, причем

$$W_a(T) = \Delta \mu_i(T), \quad (6)$$

где μ_i – химический потенциал.

Для определения ΔW_i в зависимости (4) необходимо знать величины W_{0i} и W_a . Установить W_{0i} можно для электронов – по работе выхода с поверхности известных веществ, для атомов поверхностного слоя – исходя из их общего количества (N_i) в веществе контактного пятна, массы (m_e) этого вещества, либо его молярной масса (M_1). Как следует из работ [10–12], последнее возможно, если известны значения либо энтальпии (H_{mi}) возгонки (при твердофазном спекании), либо теплового баланса (Q) (при жидкофазном спекании), обеспечивающего нагрев и плавление вещества контактных пятен при заданных удельных значениях теплоемкости (c_i), теплоты плавления вещества Λ_e , моля вещества (Λ_m):

$$W_{0i} = \frac{H_{mi}}{N_a} = \mu_{s0}; \quad W_{0i} = \frac{Q_e}{N} = \frac{m_e}{N} \left(\Lambda_e + \int_T^{T+\Delta T} c_i T \right) = \mu_{0i}, \quad W_{0i} = \frac{Q_m}{N_a} = \frac{M_i}{N_a} \left(\Lambda_m + \int_T^{T+\Delta T} c_i dT \right)_p = \mu_{0i}, \quad (7)$$

где N_a – число Авогадро.

Необходимые для выражения (5) величины W_a можно устанавливать (6) по изменению химического потенциала либо электронов проводимости (μ_e), либо атомов (молекул) (μ_i) кристаллической решетки:

$$\mu_e(T) = W_F \left[1 - \frac{\pi^2 (k_B T)^2}{12 W_F^2} \right], \quad (8)$$

где W_F – энергия Ферми; k_B – постоянная Больцмана; T – температура.

$$\mu_i = \frac{\Phi}{N_i} = \frac{H_w - TS_\gamma}{N_i} = \frac{W_u + W_s - TS_\gamma}{N_i} = \frac{W_u + \sigma_s S_\kappa - TS_\gamma}{N_i} = W_a - \frac{TS_\gamma - \sigma_s S_\kappa}{N_i}. \quad (9)$$

Здесь Φ – свободная энергия Гиббса; S_γ – энтальпия; W_u , W_s – соответственно внутренняя и поверхностная энергия атомов контактных пятен; S_κ – площадь контактных пятен; σ_s – удельная поверхностная энергия, причем

$$\sigma_s = \left(\frac{d\Phi}{dS_\kappa} \right)_{P,T,n=\frac{N}{S_\kappa}} = \left(\frac{dF_w}{dS_\kappa} \right)_{V,T,W_u} = \left(\frac{dW_u}{dS_\kappa} \right)_{S,V,n} = \left(\frac{dH_w}{dS_\kappa} \right)_{P,T,n}, \quad (10)$$

где F_w – свободная энергия Гельмгольца.

В выражении (4) на ΔW_i влияет не только химический состав, но также и форма поверхностного слоя контактных пятен. Последнее учтем исходя из соотношения площади (S_κ) к объему поверхностного слоя (V_κ) этих пятен, то есть через $\phi_i = S_\kappa/V_\kappa$. Это соотношение позволяет обобщить зависимости (6) и (9), представив их следующим равенством:

$$\mu_k = \frac{n_s(k) \sum_i \mu_i n_s(i)}{\sum_i n_s(i)} S_\kappa, \quad \mu_i = \mu_0 + \frac{1}{n_s} \left(\frac{R_g T}{S_\kappa} \ln(\alpha_k) + \sigma_s \right) = \mu_0 + \frac{1}{n_v} \left(\frac{R_g T}{V_\kappa} \ln(\alpha_k) + \sigma_s \phi_i \right), \quad (11)$$

в котором n_s – поверхностная, n_v – объемная концентрация атомов; α_k – коэффициент термодинамической активности.

$$\alpha_k = \frac{D_i}{D_n}.$$

Здесь D_n , D_i – начальный и текущий коэффициенты диффузии в твердом теле.

Используя значения энтальпии $H = H_\mu(T_x)$ для фазового перехода моля вещества в газообразное (при твердофазном спекании) или жидкое (жидкофазное спекание) состояние, а также k_B и R_g (газовую постоянную), зависимости (6) и (7) можно выразить через линейную функцию температуры:

$$T_{xi} = \frac{W_{0i}}{k_B}; \quad T_{xi} = \frac{H_{mi}(\text{возгонка})}{R_g}; \quad T_{xi} = \frac{H_{0i} + c_i M_i \Delta T}{R_g}; \quad T_i = \frac{\Delta \mu_i}{k_B} = \frac{\Delta H_m}{R_g}, \quad (12)$$

где T_x , T_i – температуры фазового перехода и активации соответственно.

Выражение (12) позволяет рассматривать проницаемость (4) межчастичного зазора как барьерную функцию, зависящую не только от контактного давления, но и от температуры:

$$D_B(p, T) = \exp \left(- \frac{4\pi l_n(p)}{h_p} \sqrt{2 M_i R_g (T_{xi} - T_i)} \right) = \exp \left(- \frac{4\pi l_n(p)}{h_p} \sqrt{2 m_i k_B (T_{xi} - T_i)} \right). \quad (13)$$

Для случая, связанного с работой выхода электрона с поверхности (W_{0e}) контактного пятна, в качестве T_{xi} для (13) можно использовать $T_e = W_{0e}/k_B$.

Рассмотрим, как проницаемость межчастичного зазора влияет на вероятность возникновения диффузионных потоков атомов и электронов между контактными пятнами. Принимая во внимание, что основу ДПС, представленную композицией порошков, которую применяют для получения наплавкой антифрикционных и износостойких покрытий высоконагруженных деталей узлов трения, составляют металлы, отнесем вещество частиц дисперсной фазы к проводникам первого рода. Тогда, учитывая зависимости (7)–(9), а также закон Фика, диффузионные потоки (J_i) электронов и атомов будут зависеть от коэффициента самодиффузии (D_k) этих частиц, а также их градиентов либо химического потенциала (μ_i), либо объемной концентрации (n_i):

$$J_i = -\frac{n_i D_k}{R_g T} \text{grad}(\mu_i) = -D_k \text{grad}(n_i). \quad (14)$$

Используемый в выражении (14) коэффициент самодиффузии с учетом модели Верта – Зинера и устанавливаемой (4) и (13) проницаемости межчастичного зазора для электронов и атомов может определяться с помощью уравнения Аррениуса, имеющего следующий вид:

$$D_k = D_B \zeta_i a_0^2 v_{0i} \exp\left(-a_{zi} \beta_i \frac{k T_{xi}}{\Delta \mu_i}\right) = D_B D_{ni} \exp\left(-a_{zi} \beta_i \frac{T_{xi}}{T_i}\right), \quad (15)$$

где ζ_i – число степеней свободы колебаний в кристаллической решетке; a_0 – период кристаллической решетки; v_{0i} – частота колебаний атома (молекулы) в кристаллической решетке; α_i – коэффициент

Зинера – Кёстера, причем $v_{0i} = \sqrt{\frac{k T_{xi}}{2\pi m_{0i} a_0^2}} = \sqrt{\frac{R_g T_{xi}}{2\pi m_i a_0^2}}$; $\alpha_i = -\frac{T_{xi}}{E_M} \frac{dE_M}{dT}$.

Величина межчастичного зазора в условиях свободной насыпки или упругого сжатия ДПС не менее чем на один-два порядка превосходит размеры кристаллической решетки, но не менее чем на порядки меньше размеров контактных пятен. Вследствие этого попадание в межчастичный зазор определенного количества атомов или электронов не приведет к существенному изменению концентраций этих частиц на поверхности контактных пятен. Причина поддержания в этих условиях постоянной концентрации атомов и электронов на поверхности контактных пятен ($n_v(0,t) = n_{0i} = N/V = \text{const}$) заключается в действующем внутри твердого тела атомно-вакансионном механизме замещения. Из-за меньшей по отношению к электрону подвижности атомы, оказавшиеся в межчастичном зазоре в конце своего движения, в основном способны только прилипнуть к одной из поверхностей контактных пятен, образуя на ней определенный слой (x). Вследствие непрерывного попадания атомов внутрь межчастичного зазора их концентрация с течением времени изменяется ($n_v = n_v(x,t)$). Связь между $n_v(x,t)$ и n_0 может устанавливаться с использованием функции ошибок:

$$n_v(x,t) = n_{0i} \cdot \text{erf}\left(\frac{x_i}{2\sqrt{D_k t}}\right). \quad (16)$$

Поскольку в условиях свободной насыпки или упругого сжатия ДПС из-за самодиффузии возможно одновременное прилипание атомов к двум контактным пятнам, то $0 \leq x \leq 0,5 \cdot l_p$. Тогда определяемый выражениями (14) и (15) поток, интегрируемый во временном промежутке, с учетом выражения (16) позволяет связать количество прилипших атомов к поверхностям контактных пятен в пересчете на единицу их площади (n_{si}) со значением n_{0i} :

$$n_{si} = \int_0^{t_x} J_i dt = -D_k \int_0^{t_x} \text{grad}(n_{vi}) dt = \frac{4n_{0i}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{D_k t}. \quad (17)$$

Провести оценку необходимого времени (t_x) для формирования путем прилипания к контактным пятнам внутри межчастичного зазора вновь создаваемых слоев определенной толщины (x) с концентрацией атомов (n_i), близкой к n_0 , можно после следующего преобразования уравнения (17):

$$t_x = \frac{\pi}{16D_k} \left(\frac{n_i}{n_0} x\right)^2; \quad t_x = \frac{\pi}{16D_k} \left(\frac{n_i}{n_0} l_n\right)^2_{x=l_p}. \quad (18)$$

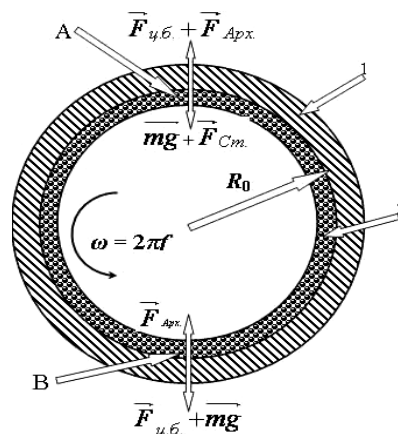
Полученные зависимости (2), (3), (14), (16), (18) совместно с (7), (8), (11), (12) позволяют оценить вероятность и длительности срачивания контактных зон твердотельных частиц дисперсной фазы, благодаря которому осуществляется переход ДПС в твердое пористое тело, как правило, представляющего в порошковой металлургии формовку. За счет использования в этих зависимостях безразмерных коэффициентов ($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$) и относительных величин ($\phi_i = S_k/V_k$) при вынесении такой оценки учитывается не только полиморфное состояние кристаллических решеток поверхностных слоев контактных пятен, но также и химический состав их атомов, включая геометрию этих поверхностей.

При моделировании кинетических процессов зависимости (2), (3), (14), (16), (19) совместно с (7), (8), (11), (12) позволяют оценить вероятность и длительность перехода в твердотельное состояние без упрочнения ДПС, находящуюся в условиях не только свободной насыпки или упругого сжатия, но и индукционного нагрева. Вышеизложенное модельное допущение устанавливает связь с общепринятой [8; 10; 11; 22; 23] моделью перехода ДПС в твердотельное состояние, согласно которой вязкость (η_s) вещества частиц дисперсной фазы зависит от размеров кристаллической решетки (a_0), зерна (L_a) поверхностного слоя и коэффициента самодиффузии (D_a), который совпадает с D_k в выражении (16) для случая, когда $D_b = 1$, а также температуры (T):

$$\eta_s = \frac{kL_a^2}{a_0^3 D_a} T. \quad (19)$$

Учтем в разрабатываемой модели влияние седиментации на характер распределения в образующемся расплаве неметаллических включений, например, в виде корунда как нанодисперсного модификатора, когда индукционная наплавка происходит в поле гравитационных и центробежных сил. Скорость седиментации в этом случае будет зависеть от массы, размера и формы частиц, вязкости и плотности среды, а также ускорения, возникающего при действии на частицы сил поля.

В исходном состоянии дисперсно-порошковой среды частицы упрочняющей фазы, представленной ультрадисперсными включениями тугоплавких оксидов или карбидов, распределены равномерно. Плотность этих частиц в два-три раза меньше плотности наплавляемого металла, составляющего основу порошковой композиционной системы, формирующей износостойкие и антифрикционные покрытия. Исходя из анализа работ [10; 11; 16; 17] можно предположить, что до перехода дисперсно-порошковой среды в расплавленное состояние существенного перераспределения частиц упрочняющей фазы в ней не произойдет. При образовании расплава на эти частицы могут действовать силы тяжести, выталкивания, сопротивления, а также центробежные силы. Предположим, что эти силы уравновешены, тогда в определенных точках цилиндрической заготовки они будут направлены так, как показано на рисунке 2.



1 – заготовка; 2 – расплавленный слой покрытия;
 $F_{ц.б.}$ – центробежная сила; $F_{Арх.}$ – сила выталкивания (Архимеда);
 $F_{См.}$ – сила сопротивления (Стокса); mg – сила тяжести;
 ω – угловая скорость, рад/с; f – частота, Гц

Рисунок 2 – Схема действия сил в предполагаемых точках равновесия

Условие равновесия в точках:

$$A: 0 = \vec{F}_{ц.б.} + \vec{F}_{Арх.} + \vec{mg} + \vec{F}_{См.}$$

$$B: 0 = \vec{F}_{ц.б.} + \vec{F}_{Арх.} + \vec{mg}.$$

Если пренебречь силами смачивания и поверхностного натяжения расплава, минимальная угловая скорость, обеспечивающая удержание в верхней точке (A) вращения цилиндрической заготовки при центробежной наплавке, может определяться по формуле:

$$\omega \geq \sqrt{\frac{g}{R_0 - h}}, \quad (20)$$

где ω – угловая скорость; g – ускорение свободного падения; R_0 – внутренний радиус цилиндрической заготовки; h – толщина покрытия, м.

В этом случае для стальных цилиндрических заготовок с радиусами 0,01...0,1 м и толщинами наплавляемых покрытий порядка 1 мм минимальные угловые скорости будут иметь значения в пределах от 10 (для $R_0 \sim 0,1$ м) до 33 рад/с (для $R_0 \sim 0,1$ м), или 96...318 об/мин.

Центробежное ускорение при этом составит 1,2...1,6g. При таких угловых ускорениях, вплоть до угловых скоростей, обеспечивающих центробежное ускорение ≤ 10 g, состояние равновесия в выбранных точках на рисунке 2 будет определяться зависимостями:

$$\omega^2 (R_0 - X) = \frac{9}{2} \cdot \frac{\eta v}{r^2 \gamma_m} - \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) g; \quad (21)$$

$$\omega^2 (R_0 - X) = \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) g, \quad (22)$$

где R_0 – внутренний радиус цилиндрической заготовки; X – глубина, на которой в расплаве достигается состояние равновесия; r – радиус частицы упрочняющей фазы; γ_0 – плотность расплава; g – ускорение свободного падения, м/с².

Из анализа свойств зависимостей (21)–(22), схемы действия сил в выбранных точках равновесия, а также результатов действия центробежной силы расплава на ультрадисперсные частицы упрочняющей фазы следует, что в точке A на глубине погружения в расплав X эти частицы могут находиться в состоянии покоя, в то время как в точке B они будут двигаться к поверхности расплава с некоторой постоянной скоростью. С учетом уравнения (22) скорость движения будет определяться зависимостью [13]:

$$v = \frac{2r^2}{9\eta} \left[\omega^2 (R_0 - X) \gamma_m + (\gamma_0 - \gamma_x) \right]. \quad (23)$$

Исходя из зависимости (23) глубина, на которой в расплаве частицы будут переходить в состояние покоя при достижении точки A (см. рис. 2), может определяться как

$$X(\omega) = R_0 - \left(\frac{\gamma_0}{\gamma_m} - 1 \right) \frac{g}{\omega^2}. \quad (24)$$

Так, например, в жидкофазных бронзовых сплавах плотностью 8,3...8,9 г/см³ и динамической вязкостью 3,0...3,3 мПа·с при температуре 1100...1200 °С, в которых равномерно распределены ультрадисперсные частицы корунда, угловые скорости, обеспечивающие переход этих частиц в состояние покоя в точке A (см. рис. 2), приведены на рисунке 3. Характер изменения скоростей движения удаленного на один миллиметр от поверхности цилиндрической заготовки фронта частиц упрочняющей фазы в течение одного оборота при угловой скорости $\omega = 42,8$ рад/с, полученных в рассматриваемом примере с использованием зависимостей (22) и (24), представлен на рисунке 4. Для этого примера скорости движения рассматриваемых частиц изменяются в пределах от нуля (верхняя точка вращения цилиндрической заготовки) до 72 м/с (нижняя точка вращения заготовки).

Если центробежное ускорение вращающихся цилиндрических заготовок с внутренними радиусами порядка 0,01...0,1 м превысит 10g, скорость ультрадисперсных частиц упрочняющей фазы следует рассчитывать по формуле [13]:

$$v = \frac{d(R_0 + X)}{dt} = \frac{2}{9} \frac{r^2 (\rho_0 - \rho_x) \omega^2 (R_0 + X)}{\eta}. \quad (25)$$

Тогда в рассматриваемом примере, согласно проводимым расчетам с использованием формулы (25), характер изменения скоростей и положения частиц упрочняющей фазы в зависимости от их размеров будет таким, как показано на рисунках 5 и 6.

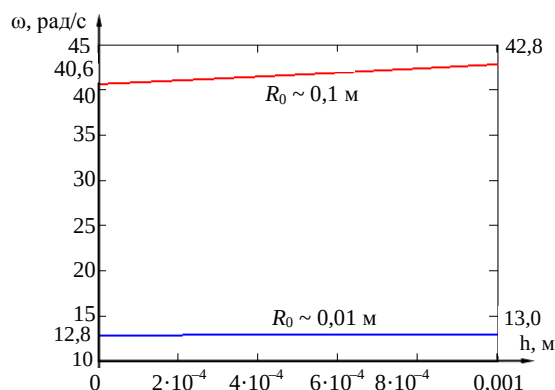


Рисунок 3 – Характер изменения угловых скоростей, обеспечивающих состояние покоя в нижней точке вращения в зависимости от толщины наплавляемых покрытий

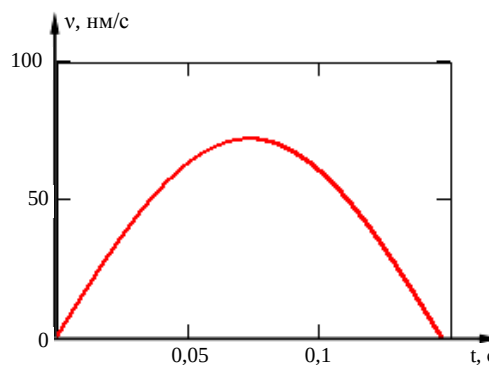


Рисунок 4 – Характер изменения скорости движения частиц упрочняющей фазы в течение одного оборота при угловой скорости $\omega = 42,8$ рад/с

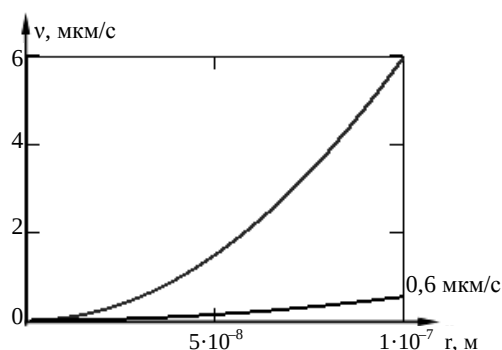


Рисунок 5 – Характер изменения скоростей частиц упрочняющей фазы в зависимости от их размеров при центробежном ускорении $16g$

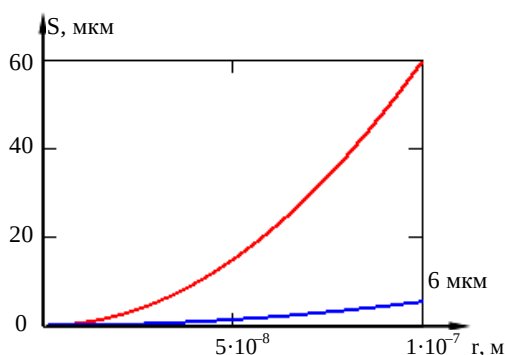


Рисунок 6 – Характер смещения от первоначального положения частиц упрочняющей фазы в зависимости от размеров при центробежном ускорении $16g$

Полученные на основе разработанной модели и представленные на рисунках 4–6 результаты согласуются с теоретическими и экспериментальными данными, приведенными в работах [10–14; 17].

Закключение. Разработана модель индукционной наплавки порошковых материалов, позволяющая рассчитывать режимы процесса с учетом особенностей дисперсно-порошковых сред, по своему композиционному составу соответствующих металломатричным композитам, которые могут использоваться для нанесения износостойких и антифрикционных покрытий на контактные поверхности высоконагруженных деталей узлов трения и сопряжений. Описаны результаты моделирования формирования контактных промежутков между частицами дисперсной фазы при упругом сжатии и влияние этого промежутка на характер перехода дисперсно-порошковой среды в твердотельное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная трибология: Итоги и перспективы / под ред. К.В. Фролова. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. Гаркунов, Д.А. Триботехника (износ и безызносность): учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
3. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Путина. – Киев: Наукова думка, 1980. – 404 с.
4. Ли, Р.И. Технология восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. пособие. – Липецк: ЛГТУ, 2014. – 379 с.
5. Гладкий, П.В. Плазменная технология / П.В. Гладкий, Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев. – Киев: Экотехнология, 2007. – 292 с.
6. Фрумин, И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – М.: Металлургия, 1961. – 424 с.

7. Костилов, В.И. Плазменные покрытия / В.И. Костилов, Ю.А. Шестерин. – М.: Металлургия, 1978. – 160 с.
8. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачева [и др.]. – М.: Металлургия, 1970. – 183 с.
9. Клименко, Ю.В. Электроконтактная наплавка / Ю.В. Клименко; под ред. Э.С. Каракозв. – М.: Металлургия, 1978. – 128 с.
10. Дорожкин, Н.Н. Получение покрытий методом припекания [Текст] / Н.Н. Дорожкин, Т.М. Абрамович, В.И. Жорник. – Минск: Наука и техника, 1980. – 176 с.
11. Электрофизические методы нанесения металлических покрытий из металлических порошков / Н.Н. Дорожкин [и др.]. – Рига: Зинатне, 1985. – 131 с.
12. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н.Н. Дорожкин [и др.]. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 159 с.
13. Импульсные электрофизические технологии получения покрытий и модифицирования поверхности материалов / К.Е. Белявин [и др.] // Металлургия. Респ. межвед. сб. науч. тр. – Вып. 34, ч. 2. – 2013. – С. 58–71.
14. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий [Текст] / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худолей // Вестн. фонда фундаментальных исследований. – Минск, 2013. – № 3(36). – С. 70–87.
15. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
16. Бальшин М.Ю. Основы порошковой металлургии / М.Ю. Бальшин, С.С. Кипарисов. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
17. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов [Текст] / К.Н. Белявин [и др.]. – Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.

Поступила 21.01.2016

MODELING OF THE PROCESS OF INDUCTION WELDING POWDER SURFACES CONTAINING NANODIMENTIONAL MODIFIERS

M. BELOTSEKOVSKY, I. SOSNOVSKY, A. KURILYONOK, O. KUZNECHIK

It analyzes the process of induction welding powder materials. A mathematical model of the processes of induction welding powder materials in the initial state of dispersion-powder medium and containing in its composition particles of the hardening phase, represented by ultrafine or nano-sized inclusions of refractory oxides or carbides. The results of modeling the formation of the contact spacing between the particles of the dispersed phase in the elastic compression and the impact of this period of transition in the nature of the powder dispersion-medium in solid condition. Using this model, it is also possible to select modes, in which under the action of centrifugal forces, the redistribution of particles of the hardening phase and nano-sized particles in the melt will be minimal.

Keywords: powder charge, antifriction coatings, centrifugal induction welding, mathematical model, nanodimensional patterns.

УДК 621.791.763.2

**ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ СПОСОБОМ
КОНТАКТНОЙ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ, БЕЗ ОБРАЗОВАНИЯ ЛИТОГО ЯДРА**

*канд. техн. наук А.Ю. ПОЛЯКОВ; канд. техн. наук, доц. С.М. ФУРМАНОВ;
канд. техн. наук, доц. Т.И. БЕНДИК; А.А. СТЕПАНОВ; М.С. КОЛОБОВА
(Белорусско-Российский университет, Могилев)*

Исследуется процесс контактной рельефной сварки. Рассмотрены варианты последовательного дозированного поэтапного ввода в межэлектродную зону электрической энергии посредством задания двухступенчатого импульса сварочного тока в совокупности с приложением к зоне сварки повышенного ковочного усилия после выключения тока. Показано, что независимо от характера ввода электрической энергии в межэлектродную зону увеличение усилия сжатия электродов относительно рекомендуемых в литературе значений во всех случаях приводит к снижению прочности соединений. Объяснением этому служат отсутствие в зоне сварки литого ядра или твердофазного кольца и наличие двух других зон – зоны активации и зоны схватывания металла свариваемых деталей.

Ключевые слова: *контактная рельефная сварка, импульс сварочного тока, дозированный ввод энергии, повышенное ковочное усилие, прочность соединения, твердофазное соединение, зона активации поверхностей, зона схватывания металла.*

В соответствии с Программой развития промышленного комплекса Республики Беларусь на период до 2020 года одним из приоритетов является снижение материало- и энергоемкости производства. При изготовлении некоторых сварных конструкций, особенно в условиях крупносерийного и массового производства (например, в автомобилестроении), оборудование потребляет существенное количество электроэнергии. Параметры режима сварки, обеспечивающие требуемое качество соединений, обычно устанавливаются в соответствии с рекомендациями многолетней давности. Сегодня благодаря интенсивному развитию приборостроения созданы различные аналого-цифровые устройства и датчики, позволяющие в режиме реального времени управлять сварочной машиной и, соответственно, кинетикой формирования сварных соединений. Основная цель данного управления – снижение энергоемкости процесса сварки при сохранении и возможном повышении заданного уровня прочности соединений. В первую очередь, это касается способов контактной сварки как наиболее производительных и легко поддающихся автоматизации.

Исследовательская часть. *Контактная рельефная сварка (КРС) представляет собой способ сварки давлением, при котором образование неразъемного соединения происходит в результате пропуска импульсов сварочного тока через зажатые между электродами детали, на поверхности одной из которых предварительно имеется естественный или искусственный выступ (рельеф), по вершине которого концентрируются линии протекания сварочного тока. При этом наблюдается высокая плотность сварочного тока по вершине рельефа, что объясняется малой начальной площадью контакта деталей [1]. Контактная рельефная сварка имеет важное преимущество перед контактной точечной сваркой (КТС) – малая площадь контакта деталей при нагреве, ограничиваемая формой и размерами рельефа. Благодаря этому при КРС теплоотвод в свариваемые детали и электроды существенно уменьшается, а электрическая энергия затрачивается преимущественно на нагрев условного столбика металла высотой, равной суммарной толщине свариваемых деталей, и диаметром, равным диаметру рельефа [2]. При этом рельефные сварные соединения имеют повышенную прочность на начальной стадии их образования, что объясняется интенсивной радиально направленной пластической деформацией металла в области сварочного контакта [3]. Эта деформация в 10...15 раз больше, чем при КТС [4].*

Несмотря на перечисленные достоинства, исследователи КРС ранее неоднократно предлагали усовершенствовать данный процесс в вопросе энергоэффективности. Подразумевалась КРС в твердой фазе, т.е. без расплавления металла свариваемых деталей [3]. Это позволило бы существенно уменьшить количество электрической энергии, потребляемой сварочной контактной машиной в каждом цикле сварки, при одновременном сохранении приемлемого уровня прочности формируемых сварных соединений. Однако на практике данный процесс был исследован недостаточно, что усугубляется спорными, на наш взгляд, рекомендациями о необходимости расчета режимов КРС по уравнению теплового баланса, первоначально разработанного только для КТС [4].

Первоначально нами был разработан способ КТС и КРС, при котором свариваемые детали устанавливаются и сжимаются между электродами сварочной машины с действующим в течение всей сварки усилием, пропускают через детали в течение времени $\tau_{\text{св}}$ импульс сварочного тока $I_{\text{св}}$, выключают ток и производят проковку сварного соединения в течение заданного времени $\tau_{\text{ков}}$, причем импульс сварочного тока задают многоступенчатым, длительность его протекания $\tau_{\text{св}}$ при задаваемых на каждой из ступе-

ней импульса значениях тока $I_{CB1}, I_{CB2}, \dots, I_{CBn}$ находят по формуле $\tau_{CB} = \tau_{CBФ1} + \tau_{CBФ2} + \dots + \tau_{CBФn}$, где $\tau_{CBФ1}, \tau_{CBФ2}, \dots, \tau_{CBФn}$ – фактические длительности протекания тока на каждой из ступеней его задания, каждую из которых определяют фактическим достижением требуемого значения суммарного тепловложения в зону сварки $Q_{ЭЭ}$, равного $Q_{ЭЭ} = Q_{ТР1} + Q_{ТР2} + \dots + Q_{ТРn}$, где $Q_{ТР1}, Q_{ТР2}, \dots, Q_{ТРn}$ – требуемые значения тепловложения в зону сварки для значений тока $I_{CB1}, I_{CB2}, \dots, I_{CBn}$ на каждой из ступеней его импульса (рис. 1) [5].

Задача заявляемого способа состояла в существенном уменьшении вероятности возникновения дефектов, а именно начальных и конечных выплесков расплавленного металла из зоны соединения при КТС и КРС.

Благодаря тому, что импульс сварочного тока много-ступенчатый, имеется возможность плавной регулировки скорости деформации рельефов на каждом из основных этапов кинетики формирования соединения. Так как требуемое значение суммарного тепловложения в зону сварки $Q_{ЭЭ}$ задается как сумма требуемых значений тепловложений для каждой из ступеней импульса тока, имеется возможность определения фактической длительности протекания тока τ_{CB} на отдельных ступенях его импульса ($\tau_{CBФ1}, \tau_{CBФ2}, \dots, \tau_{CBФn}$), что в конечном итоге обеспечивает выключение сварочного тока контактной машиной в точном соответствии с достигнутым требуемым тепловложением в зону сварки. Это обеспечивает не только равномерность термометформационных процессов в зоне сварки со своевременным выключением сварочного тока, но и возможность дозированного ввода электрической энергии в межэлектродную зону на различных этапах нагрева [6].

Для реализации предложенного способа КТС и КРС была разработана система автоматического управления процессом КРС, содержащая контактную машину, управляемую от регулятора цикла сварки, аналого-цифровую плату сбора данных и устройство согласования, отличающаяся тем, что в устройстве согласования использованы электромагнитные реле и операционные усилители с возможностью выработки и усиления управляющих импульсов напряжения заданной амплитуды и формы на кабель управления регулятора цикла сварки [7].

Система автоматического управления процессом КРС содержит: контактную машину, представленную на рисунке 2 регулятором цикла сварки 1, электродами контактной машины 2 и блоком поджига тиристоров 3; датчик тока 4; пару экранированных кабелей 5 для регистрации напряжения межэлектродной зоны; аналого-цифровую плату сбора данных 6; устройство согласования 7, включающее в себя электромагнитные реле и операционные усилители; кабель управления 8; свариваемые детали 9; литую зону соединения свариваемых деталей 10.

Принцип работы системы: в процессе КРС аналого-цифровая плата сбора данных 6 на каждом из этапов кинетики формирования соединения воздействует на позицию «НАГРЕВ» регулятора цикла сварки 1 посредством кабеля управления 8 и устройства согласования 7 подачи низковольтных сигналов внешнего управления напряжением от 0 до 0,065 В. Регулятор с помощью тиристорного контактора 3 в первичной цепи сварочного трансформатора устанавливает требуемый сварочный ток во вторичной цепи в диапазоне от $0,41 \cdot I_{CB\max}$ до $I_{CB\max}$.

Плата сбора данных также регистрирует и обрабатывает мгновенные сигналы сварочного тока I'_{CB} и напряжения межэлектродной зоны $U'_{ЭЭ}$ посредством установленного на электродах контактной машины 2 датчика тока 4 и пары экранированных кабелей 5 с последующим расчетом и сравнением полной энергии, выделяемой в зоне сварки, с требуемыми значениями. Затем в определенный момент времени достижения энергией требуемого расчетного значения плата переключает электромагнитное реле уст-

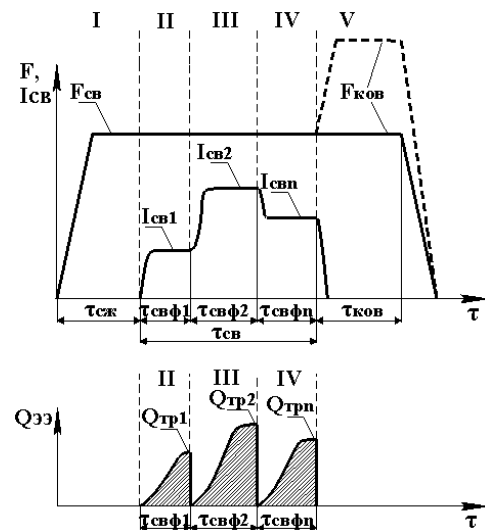


Рисунок 1 – Способ контактной точечной и контактной рельефной сварки

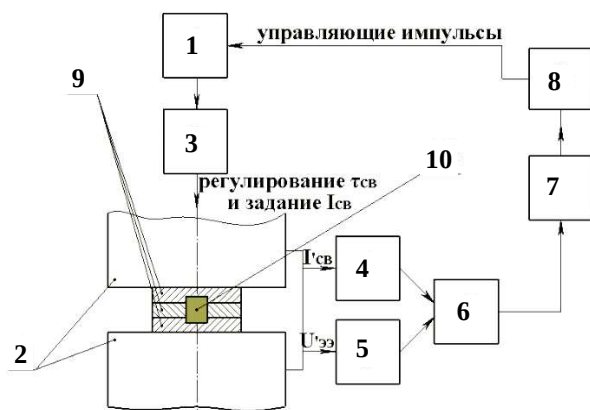


Рисунок 2 – Система автоматического управления процессом контактной рельефной сварки

ройства согласования 7, которое воздействует на позицию «ОГРАНИЧЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТОКА» регулятора цикла сварки 1 и, соответственно, выключает сварочный ток. В результате обеспечивается автоматическая регулировка длительности протекания сварочного тока, причем требуемый уровень сварочного тока задается отдельно на каждом из этапов кинетики формирования сварного соединения, что стабилизирует формирование литой зоны 10 требуемых размеров и формы без наличия дефектов.

Далее для изучения предложенного способа КТС и КРС была разработана экспериментальная установка на базе системы автоматического управления процессом КРС. Принцип работы установки: непосредственно в процессе КРС (в режиме реального времени) аналого-цифровое устройство сбора данных посредством датчика тока и пары экранированных кабелей регистрирует с дискретностью 0,001 с мгновенные сигналы напряжения межэлектродной зоны и напряжения, пропорционального сварочному току, во временных интервалах 0,009 с. За каждый временной интервал программа среды LABVIEW последовательно рассчитывает кривые действующего сварочного тока и напряжения, сопротивления и мощности межэлектродной зоны, а также электрическую энергию, вкладываемую в межэлектродную зону. После этого в каждом временном интервале выделяется пиковое значение электрической энергии, вкладываемой в межэлектродную зону, после чего эти значения аккумулируются нарастающим итогом. Как только фактическая электрическая энергия, вводимая в межэлектродную зону, достигает значения, заданного в программе среды LABVIEW, устройство сбора данных вырабатывает импульсы напряжения, которые усиливаются устройством согласования, поступают по кабелю управления на регулятор цикла сварки и выключают сварочный ток. Причем программа среды LABVIEW позволяет задавать многоступенчатые импульсы тока определенной величины с дозированным вводом электрической энергии в межэлектродную зону на каждой из ступеней импульса тока. При работе установка игнорирует первоначальные настройки регулятора цикла сварки, т.е. осуществляется внешнее управление процессом КРС.

Далее с помощью экспериментальной установки мы исследовали процесс КРС заводских соединений засовов замков сувальдных производства ОАО «Могилевский завод «Строммашина» с заданием трехступенчатого импульса сварочного тока в соотношении «ток I_1 , равный 50% от расчетного тока I_2 – расчетный (максимальный) ток I_2 – ток I_1 , равный 50% от расчетного тока I_2 » и с соответствующим трехэтапным дозированным вводом электрической энергии в межэлектродную зону в соотношении «энергия, равная 5% от расчетной – расчетная энергия – энергия, равная 5% от расчетной». При этом расчетная энергия определялась по уравнению теплового баланса [3]. В результате прочность сварных засовов при испытании статическим нагружением на срез удалось повысить на 13% в сравнении с требуемой, а энергопотребление сварочной контактной машины снизилось на 35% [8]. При этом форма литой зоны из зауженной перешла в равномерно расширенную по всему сечению макрошлифа, а в ее структуре вместо мартенсита появилась равномерная мартенситно-бейнитная область, свидетельствующая о снижении скоростей нагрева и охлаждения металла в процессе сварки [6]. Годовая экономия электроэнергии при внедрении составила 1282133,29 Вт·ч на 180000 изделий.

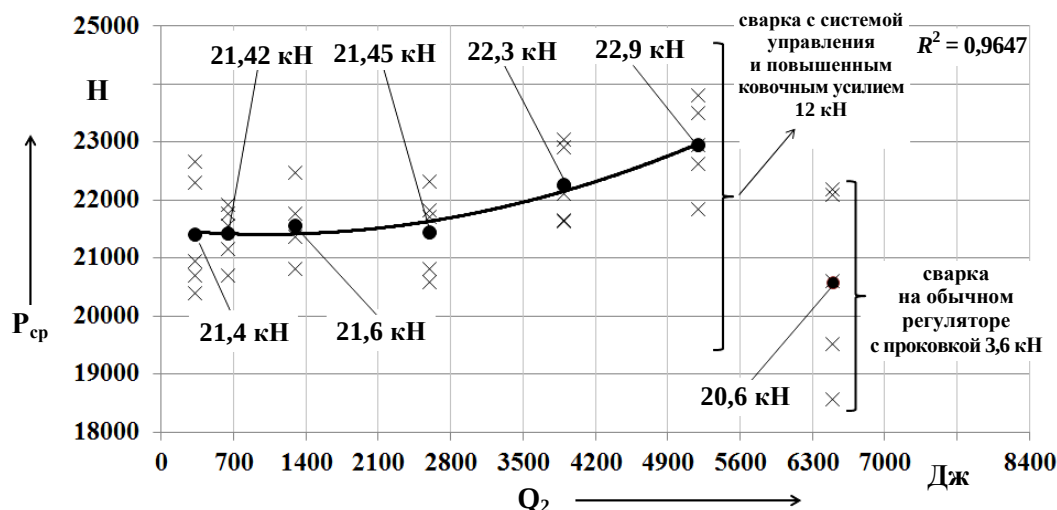
После этого использовали предложенный способ сварки в комбинации с приложением к зоне сварки повышенного ковочного усилия электродов $F_{\text{КОВ}}$ после выключения сварочного тока. Способом КРС на машине МТ-3201 сваривались образцы из двух пластин из стали 08кп размером 90×22 мм толщиной 2,5+2,5 мм. Выштампованный круглый рельеф располагался на одной из деталей.

Установлено, что трехступенчатый импульс тока с соотношением «ток I_1 , равный 50% от расчетного тока I_2 / расчетный (максимальный) ток I_2 / ток I_1 , равный 50% от расчетного тока I_2 » и с соответствующим дозированным вводом энергии в соотношении «энергия, равная 5% от расчетной / энергия, равная 60% от расчетной / энергия, равная 5% от расчетной» в комбинации с приложением к зоне сварки $F_{\text{КОВ}} = 12$ кН после выключения тока позволяет повысить прочность сварного соединения при испытании статическим нагружением на срез на 6...7% при уменьшении вводимой энергии на 30% относительно расчетного значения по уравнению теплового баланса.

Однако с точки зрения обеспечения прочности полученный результат не соответствовал ожидаемому, так как $F_{\text{КОВ}}$ подключалось сразу после третьей ступени импульса с 50%-ным током, выполнявшим функцию последующего подогрева зоны сварки. То есть ковочное усилие прикладывалось к сварному соединению, которое практически закристаллизовалось к моменту выключения тока.

Вследствие этого был проведен другой эксперимент. На машине МТ-3201 при КРС соединений, состоящих из 2 деталей толщиной 2 мм из низкоуглеродистой стали, использовали двухступенчатый импульс тока с соотношением «ток I_1 , равный 50% от расчетного тока I_2 – расчетный (максимальный) ток I_2 » и последующим приложением $F_{\text{КОВ}}$ после выключения сварочного тока. При этом на первой ступени импульса тока в межэлектродную зону дозированно вводилось 5% от расчетной энергии. Энергию, дозированно вводимую на второй ступени импульса тока, последовательно уменьшали: вводили 80% от расчетной энергии, затем 60%, 40, 20, 10 и 5%. Сравнение велось с изложенным в литературе режимом сварки, полученным в соответствии с уравнением теплового баланса. Затем проводились прочностные испытания всех сварных соединений статическим нагружением на срез.

В итоге установлено, что при уменьшении электрической энергии, вводимой в межэлектродную зону, в 10 раз относительно расчетного значения (согласно уравнению теплового баланса) прочность сварного соединения не уменьшилась, а даже повысилась, если сравнивать усилие разрушения по средним значениям: 20,6 кН – при сварке на базовом режиме без приложения $F_{\text{КОВ}}$; 21,4 кН – при сварке с использованием двухступенчатого импульса тока, дозированного вводом энергии и приложением $F_{\text{КОВ}} = 12$ кН после выключения тока (рис. 3). Характер разрушения образцов, сваренных на этом режиме, неоднозначный – разрушение возможно и срезом по сварной точке, и вырывом по основному металлу. Все 30 образцов, сваренных с использованием системы автоматического управления процессом, разрушились по основному металлу. При этом диаметр литого ядра соответствовал ГОСТ 15878-79.



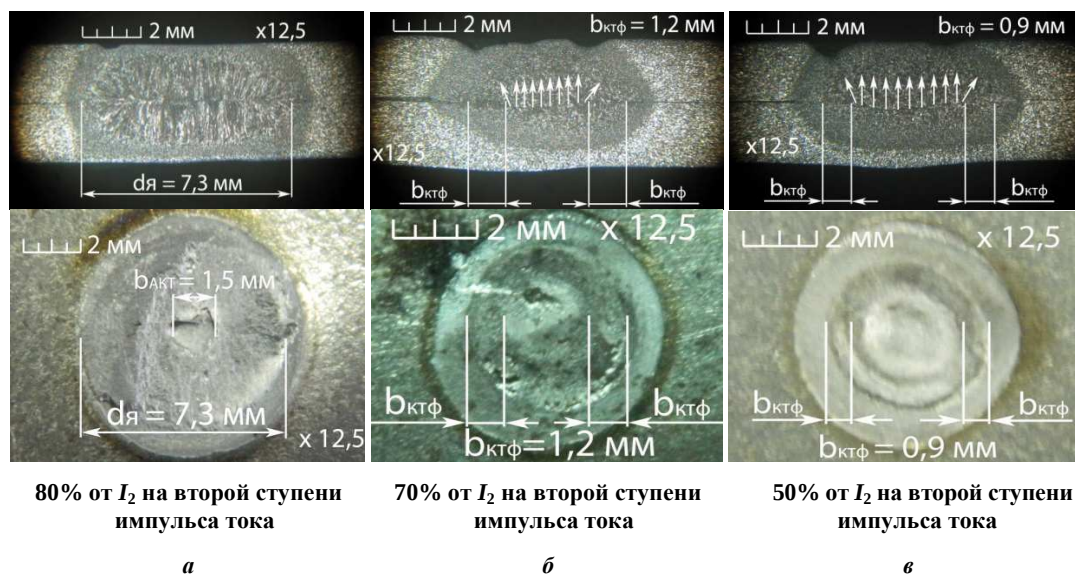
$P_{\text{ср}}$ – нагрузка, выдержанная образцом при испытании статическим нагружением на срез;
 R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации

Рисунок 3 – Влияние ввода электрической энергии Q_2 на второй ступени импульса тока с последующим приложением $F_{\text{КОВ}}$ после выключения тока на прочность соединения

Для дальнейшей оптимизации полученного режима сварки был проведен следующий эксперимент. На машине МТ-3201 при КРС соединений, состоящих из 2 деталей толщиной 2 мм из низкоуглеродистой стали (по одному круглому выштампованному рельефу), мы двухступенчатым импульсом сварочного тока в два этапа дозированно вводили в межэлектродную зону по 5% от расчетной электрической энергии. На первой ступени импульса ток I_1 составлял 50% от расчетного тока I_2 . Ток I_2 , задаваемый на второй ступени импульса, последовательно уменьшали: задавали ток, равный 80% от расчетного, затем 70%, 60, 55 и 50%. После выключения сварочного тока во всех случаях к зоне сварки прикладывалось $F_{\text{КОВ}} = 12$ кН. Сравнение велось с режимом КРС, установленным в предыдущем эксперименте: двухступенчатый импульс тока с соотношением «ток I_1 , равный 50% от расчетного тока I_2 / расчетный (максимальный) ток I_2 »; введение в два этапа энергии, в 10 раз меньшей в сравнении с расчетной; приложение к зоне сварки $F_{\text{КОВ}} = 12$ кН после выключения сварочного тока.

В результате проведенного исследования установлено, что уменьшение сварочного тока на второй ступени импульса относительно расчетного (максимального) значения лишь на 20% приводит к уменьшению прочности сварного соединения уже на 14% (с 21,4 до 18,4 кН) независимо от приложения $F_{\text{КОВ}}$ к зоне сварки после выключения тока. И в дальнейшем тенденция к уменьшению прочности усиливается.

Таким образом, несмотря на наличие подогревочного тока I_1 , вводящего в межэлектродную зону, минимальную часть от расчетной электрической энергии, достаточную для стабилизации сопротивления межэлектродной зоны и избежания начального выплеска металла, только максимальный расчетный ток I_2 обеспечивает введение в межэлектродную зону за минимально возможное время такой части от расчетной электрической энергии, которой достаточно для взаимного расплавления и объемного взаимодействия металла свариваемых деталей. В противном случае не соблюдается требование жесткости режима сварки, в результате чего вместо литого ядра образуется твердофазное кольцо, обеспечивающее в конечном итоге меньшую прочность соединения (рис. 4). С другой стороны, следует отметить, что уменьшение сварочного тока на второй ступени импульса относительно расчетного (максимального) значения даже на 50% не приводит к полной потере прочности сварного соединения – наблюдается снижение лишь на 33% (14,3 кН вместо 21,4 кН).



$d_{я}$ – диаметр литого ядра; $b_{акт}$ – зона активации; $b_{кф}$ – ширина кольца твердой фазы (стрелками показаны направления выдавливания металла при сварке)

Рисунок 4 – Макрошлифы и места разрушения соединения, отражающие влияние I_2 на характер формирования соединения

Таким образом, в случаях сварки некоторых малоответственных конструкций, к которым предъявляются требования невысокой прочности, твердофазное рельефное сварное соединение без расплавления со схватыванием по периметру может считаться допустимым. В таких случаях максимальный расчетный ток должен обеспечивать введение в межэлектродную зону за минимально возможное время такой части от расчетной электрической энергии, которой достаточно:

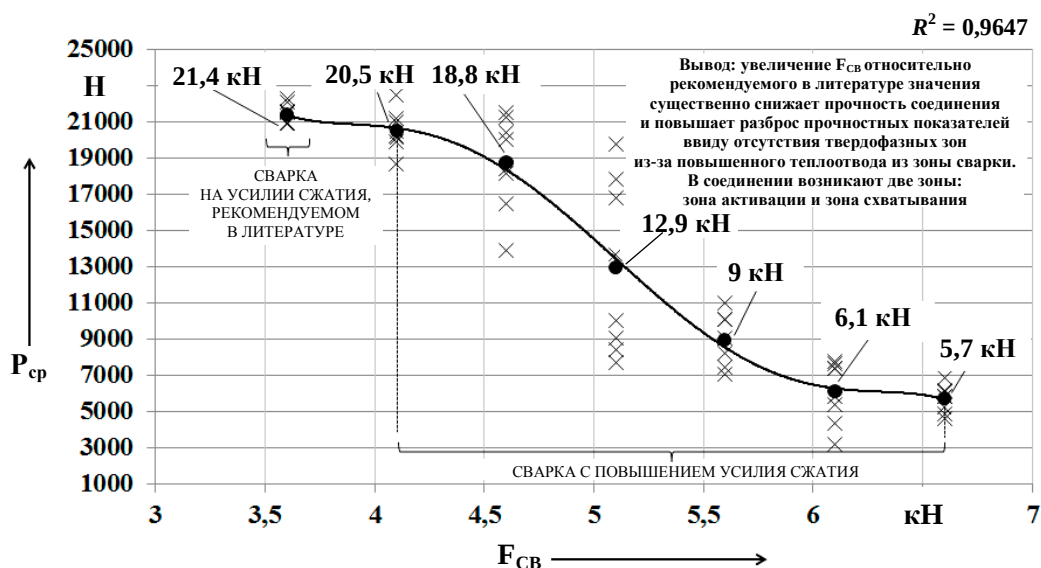
- для вдавливания центральной части рельефа в металл второй детали;
- для деформирования рельефа в обратную сторону с целью закрытия лунки от штамповки;
- для выдавливания наружной части рельефа в радиальном направлении в зазор между деталями;
- для нагрева металла рельефа, выдавленного в зазор, с целью образования твердофазного кольца в зоне соединения.

В таких случаях $F_{ков}$ необходимо прикладывать к зоне сварки после выключения сварочного тока с целью дополнительного упрочнения полученного твердофазного кольца и зоны схватывания металла вокруг него.

Далее было проанализировано влияние увеличения усилия сжатия электродов $F_{св}$ на прочность рельефного сварного соединения. На машине МТ-3201 КРС сваривались соединения, состоящие из 2-х деталей толщиной 2 мм из низкоуглеродистой стали, по одному круглому выштампованному рельефу. За базовый принимался режим, установленный в предыдущем эксперименте: использовался двухступенчатый импульс тока с соотношением «ток I_1 , равный 50% от расчетного тока I_2 – расчетный (максимальный) ток I_2 »; на каждом из уровней тока фиксированно вводилось по 5% от энергии, рассчитанной по уравнению теплового баланса; усилие сжатия при сварке составляло 3,6 кН по рекомендации [2]; после выключения тока к зоне сварки прикладывалось $F_{ков} = 12$ кН. При эксперименте усилие сжатия электродов $F_{св}$ последовательно увеличивали до 4,1; 4,6; 5,1; 5,5; 6,1 и 6,6 кН; $F_{ков}$ составляло: 14; 15,8; 17,8; 20,8; 22,8 и 24 кН соответственно (на машине МТ-3201 $F_{ков}$ выставляется автоматически в зависимости от установленного $F_{св}$).

В результате эксперимента выявлено, что увеличение $F_{св}$ относительно рекомендуемого в литературе значения лишь на 0,5 кН приводит к падению прочности соединения с 21,4 до 20,5 кН, или на 4...5%. В дальнейшем тенденция усиливается: при увеличении $F_{св}$ на 3 кН прочность падает с 21,4 до 5,7 кН, или на 74 % (рис. 5). Это связано с тем, что при КРС с увеличением $F_{св}$ существенно увеличивается площадь контакта металла свариваемых деталей, что приводит к значительному уменьшению сопротивления межэлектродной зоны и, как следствие, повышенному теплоотводу из зоны сварки. Вместо твердофазного соединения образуется соединение, имеющее две зоны: зону активации поверхностей свариваемых деталей (прилегающую к вершине рельефа) и зону схватывания металла свариваемых деталей (зона физического контакта). В зоне активации из-за повышенного теплоотвода, концентрации линий протекания тока от центра к периферии рельефа, а также выдавливания металла рельефа в осевом и радиальном направлениях нагрев в вершине рельефа существенно уменьшается, что не позволяет в достаточной мере

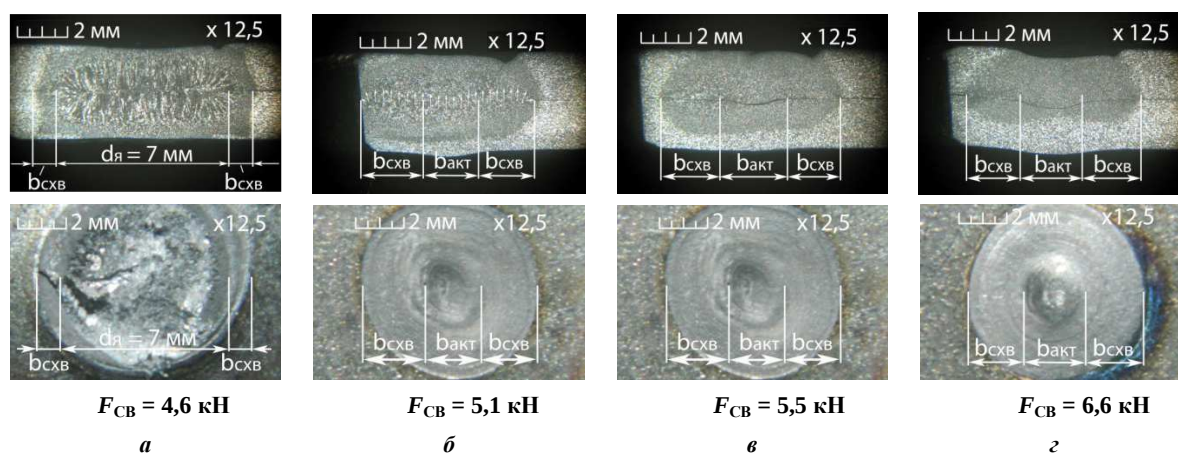
ликвидировать из контакта оксидные пленки и окислы. Об этом свидетельствует металлический блеск данной зоны на картинах разрушения образцов, а также четко видимая линия стыка на макрошлифах (рис. 6). При сопоставлении макрошлифов четко просматривается уменьшение степени прогрева нижней детали с увеличением F_{CB} ввиду повышенного теплоотода из зоны контакта.



P_{CP} – нагрузка, выдержанная образцом при испытании статическим нагружением на срез;

R^2 – коэффициент достоверности аппроксимации

Рисунок 5 – Влияние F_{CB} на прочность соединения



$d_{я}$ – диаметр литого ядра; $b_{акт}$ – зона активации; $b_{схв}$ – зона схватывания металла (стрелками показаны направления выдавливания металла при сварке)

Рисунок 6 – Влияние увеличения F_{CB} на характер формирования соединения

Закключение. В результате проведенных исследований изучен процесс контактной рельефной сварки по круглому выштампованному рельефу соединений, состоящих из двух деталей из низкоуглеродистой стали, с дозированным двухэтапным введением в межэлектродную зону электрической энергии, а также приложением к зоне сварки повышенного ковочного усилия после выключения сварочного тока.

Установлено следующее:

- для повышения прочности сварных соединений при контактной рельефной сварке повышенное ковочное усилие целесообразно прикладывать к зоне сварки сразу после выключения сварочного тока независимо от характера нагрева металла при сварке, так как упрочнение будущей литой зоны происходит только в момент кристаллизации ее расплавленного металла;

- при контактной рельефной сварке использование двухступенчатого введения электрической энергии в межэлектродную зону определенными токами – подогревочным, составляющим 50% от расчетного, и расчетным (максимальным) током – в совокупности с приложением к зоне сварки повышенного ковоч-

ного усилия после выключения тока позволяет в 8...10 раз снизить энергопотребление сварочной контактной машины в каждом цикле сварки без ущерба прочности соединений;

- в некоторых случаях контактной рельефной сварки малоответственных конструкций, воспринимающих незначительные эксплуатационные нагрузки, допускается уменьшать максимальный ток в двухступенчатом импульсе на 20...50%, что снижает прочность соединений лишь на 14...33% при испытаниях статическим нагружением на срез. Это объясняется образованием в соединении твердофазного кольца вместо литого ядра;

- при контактной рельефной сварке с двухступенчатым дозированным введением электрической энергии в межэлектродную зону увеличение усилия сжатия электродов лишь на 0,5 кН относительно рекомендуемых в литературе значений приводит к снижению прочности соединения на 4...5%, а увеличение на 3 кН – к снижению прочности на 74%. Это объясняется отсутствием в зоне сварки как литого ядра, так и твердофазного соединения с соответствующим наличием двух других зон – зоны активации и зоны схватывания металла свариваемых деталей – в связи с повышенным теплоотводом из зоны контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор основных параметров режима контактной точечной и рельефной сварки на основе математических моделей процессов / В.П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 2. – С. 23–28.
2. Гуляев, А.И. Технология и оборудование контактной сварки / А.И. Гуляев. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
3. Гилевич, В.А. Технология и оборудование рельефной сварки / В.А. Гилевич. – Л.: Машиностроение, 1976. – 151 с.
4. Березиенко, В.П. Технология сварки давлением / В.П. Березиенко, С.Ф. Мельников, С.М. Фурманов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2009. – 256 с.
5. Способ контактной точечной и/или рельефной сварки: уведомление о регистрации изобретения под № 19977 от 07.12.2015 по заявке № а 20131384 в Государственном реестре изобретений (авторы: А.Ю. Поляков, С.М. Фурманов, Т.И. Бендик, С.С. Кораткевич, А.О. Булышко).
6. Поляков, А.Ю. Контактная рельефная сварка с автоматическим регулированием параметров режима: дис. канд. техн. наук: 13.02.2015 / А.Ю. Поляков. – Могилев, 2015. – 204 с.
7. Система автоматического управления процессом рельефной сварки: пат. 10481 (U) Респ. Беларусь, МПК В 23 К 11/10 / А.Ю. Поляков, С.М. Фурманов, Т.И. Бендик, С.С. Кораткевич, А.О. Булышко; заявл. 18.11.2013; опубл. 30.12.2014.
8. Поляков, А.Ю. Разработка технологического процесса контактной рельефной сварки пакетных соединений засовов замков / А.Ю. Поляков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 56–67.

Поступила 13.01.2016

ON THE STRENGTH OF THE COMPOUNDS, PREPARED BY PROJECTION WELDING WITHOUT FORMING A MOLTEN CORE

A. POLYAKOV, S. FURMANOV, T. BENDIK, A. STEPANOV, M. KOLOBOVA

The results of the study of the projection welding. The variants of sequential dosing step input in the electrode area of electric power by setting a two-stage pulse welding current in conjunction with an application to the welding zone of high forging efforts after turning off the power. When welding critical structures for strength joints molten core of the desired diameter can be obtained by typing in the electrode area of electric power, reduced to eight to ten times compared with the calculated value of the heat balance equation, but the welding current at the second stage pulse should not be lower than estimated. When welding irresponsible designs perceiving low operating load, in conjunction instead of molten core may be prepared by solid ring without melting from the grasp of the perimeter by reducing the rated current of the two-stage pulse of up to two times. Whatever the nature of the input electrical energy in the electrode area increasing clamping force of the electrodes on recommended literature values in all cases leads to a decrease in bond strength due to the lack in the welding zone molten core or solid ring, and the presence of the other two zones – the activation zone and the zone setting metal parts to be welded.

Keywords: projection welding, impulse welding current, metered energy input, high forging force, bond strength, solid compound, surface activation zone, the zone setting of the metal.

УДК 621.793.620.172

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВАЛОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ ДИСКРЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Ю.В. ВОЛКОВ

(Кировоградский национальный технический университет);

канд. техн. наук, доц. В.Н. ЛОПАТА

(НТУУ «Киевский политехнический институт»);

канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА

(Полоцкий государственный университет);

канд. техн. наук, доц. М.С. АГЕЕВ

(Херсонская государственная морская академия)

Анализируются способы повышения ресурса валов как наиболее дорогостоящих деталей, которые достаточно изучены, отработаны и продолжают совершенствоваться. Сделан вывод о том, что проблема повышения ресурса валов дизель-генераторов, несмотря на большой объем выполненных исследований, остается актуальной. Предложен способ восстановления и упрочнения валов дизель-генераторов электроконтактным припеканием дискретных покрытий и технологическая схема для его реализации. Вариант покрытий дискретной структуры повышает их несущую способность. Использование восстановленных валов позволяет снизить затраты ремонтных предприятий на запасные части, сохранить большое количество металла.

Ключевые слова: покрытия дискретной структуры, электроконтактное припекание, износостойкость, напряженно-деформированное состояние, износостойкие покрытия, валы дизель-генераторов.

Состояние и актуальность проблемы. Эффективное использование дизель-генераторов в значительной степени зависит от их технического состояния. Одной из проблем их ремонтного производства является восстановление и упрочнение валов (распределительных и коленчатых). Способы повышения ресурса валов, как наиболее дорогостоящих деталей, достаточно изучены, отработаны и продолжают совершенствоваться. Однако несмотря на большой объем выполненных исследований и проведенных экспериментальных работ проблема повышения ресурса валов дизель-генераторов остается весьма актуальной и сегодня. Среди существующих способов восстановления и упрочнения таких валов наибольшую часть занимают сварочные технологии. С помощью сварки и наплавки восстанавливаются изношенные поверхности валов путем нанесения на их рабочие поверхности покрытий, которые противодействуют абразивному, коррозионному и другим видам изнашивания и разрушения. Вместе с тем повышенное тепловыделение при нанесении слоев большой толщины методами наплавки и напыления искажает геометрию восстанавливаемой детали, снижает ее ресурс, а наплавка покрытий больших толщин требует снятия значительных припусков при финишной механической обработке [1]. Методы наплавки не обеспечивают сохранение исходных свойств материала покрытий, вносят существенные изменения в структуру материала упрочняемой детали. Связано это с тем, что материал покрытия нагревается до температур, превышающих его температуру плавления. Твердость полученных покрытий оказывается значительно ниже, чем у исходных порошков, снижаются физико-механические свойства покрытий, в итоге невозможно получение наиболее высоких эксплуатационных свойств упрочняемых деталей в целом [1]. Перспективным и эффективным средством решения этой проблемы является применение износостойких покрытий дискретной структуры [2; 3]. Принцип формирования дискретных покрытий заключается в том, что традиционный сплошной слой покрытия заменяют на прерывистый, имеющий мозаично-дискретную структуру (рис. 1).

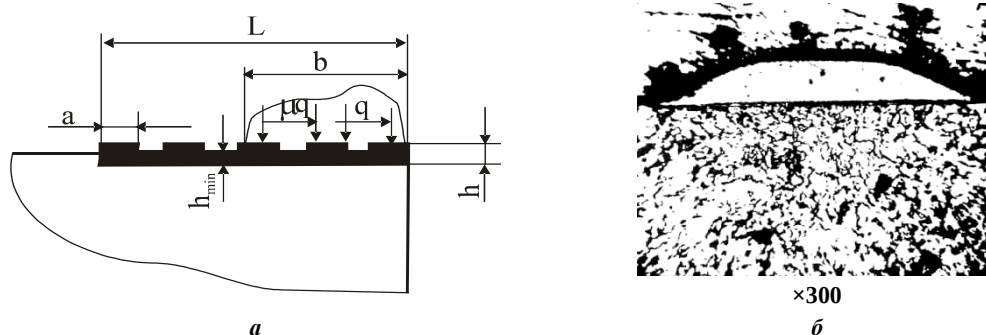


Рисунок 1 – Схема поверхности с дискретным покрытием (а) и поперечное сечение дискретного участка покрытия (б)

Принцип покрытий дискретной структуры реализуется различными технологическими способами (рис. 2). Дискретная точечная закалка позволяет избежать деформационных поводов и финишного шлифования за счет низкой температуры обрабатываемого изделия (менее 100°C) и отсутствия закалочных сред, «сухой» и «холодный» процесс требует на порядок меньше электроэнергии в сравнении с традиционной закалкой ТВЧ [2]. Дискретная природа лазерного упрочнения позволяет обрабатывать дискретными участками лишь 12...18% поверхности. С увеличением сплошности покрытия свыше 12...18 % вплоть до 100% не повышается износостойкость при лазерном упрочнении, что приводит к росту производительности лазерного упрочнения минимум в 3 раза при одновременном снижении затрат электроэнергии также в 3 раза. В то же время это позволит отказаться от сложных «роботизированных» систем перемещения и сканирования лазерного луча, перейдя на один ускоренный проход в одном направлении [2].

Покрытия дискретной структуры наносят газотермическим способом на длинномерные детали с прерывистостью структуры по линии действия максимальных напряжений, детонационно-газовым способом, а также электролитическим. Газотермическое напыление дискретных покрытий протекторного свойства на длинномерные теплообменники повысило предельное состояние деформируемой основы более чем в 3 раза за счет повышения когезионной и адгезионной стойкости покрытия [2; 3]. Разработан ряд технологий для ионного азотирования в безводородной среде (рис. 2, а) [2]. Положительный эффект при нанесении дискретных покрытий обеспечивает применение гибких вакуумных технологий. Вакуумно-плазменное напыление (рис. 2, б) оказались наиболее эффективны для дискретных покрытий на металлорежущем инструменте – повысили долговечность твердосплавных неперетачиваемых режущих пластин более чем в 3 раза при одновременном повышении чистоты обрабатываемой поверхности в 2 раза по сравнению с таким же сплошным покрытием [4]. Наиболее простой в реализации нанесения дискретного покрытия – способ электроискрового легирования (ЭИЛ) [5], который дискретен по своей природе (рис. 2, в).

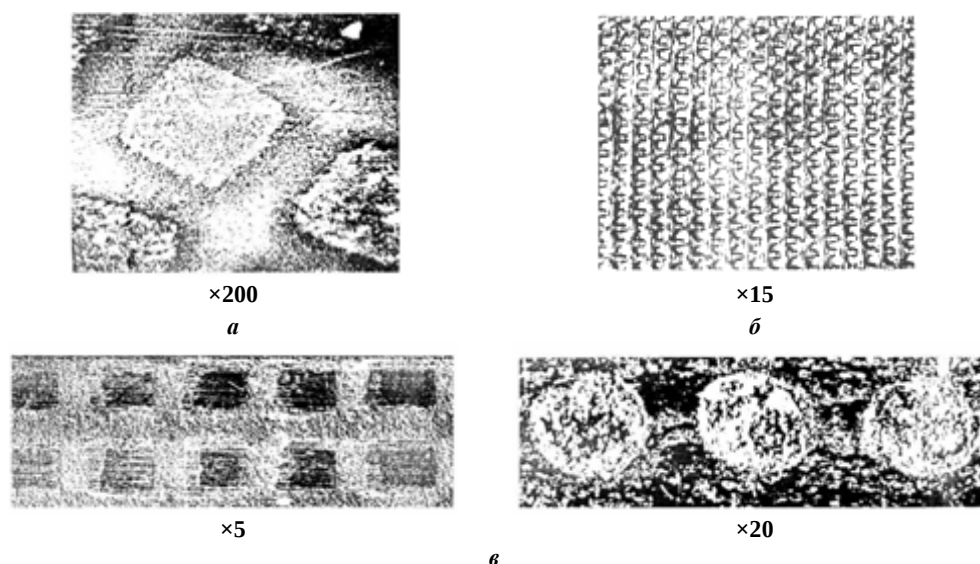


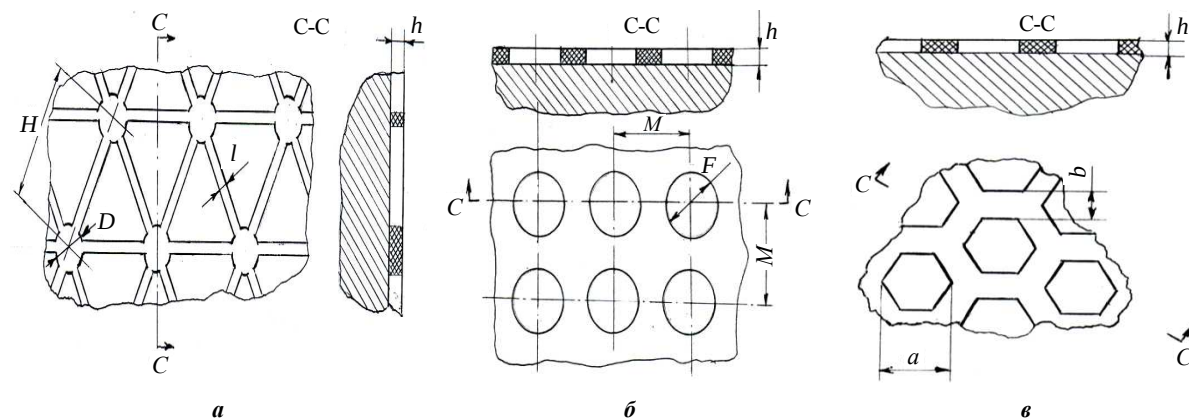
Рисунок 2 – Фрагменты поверхности с покрытиями дискретной структуры, полученные химико-термической обработкой (а), вакуумно-плазменным напылением (б), электроискровым легированием (в)

При нанесении покрытия дискретной структуры метод ЭИЛ обладает рядом достоинств [5]:

- единичный электрический разряд позволяет обеспечить стабильность размеров и свойств отдельного дискретного участка покрытия;
- изменением параметров каждого отдельного разряда можно наносить дискретные участки различных размеров, прежде всего различной толщины. Этим обеспечивается возможность нанесения дифференциального покрытия, т.е. покрытия переменной толщины;
- изменением частоты импульсов или скорости относительного перемещения электрода и детали можно регулировать количество дискретных участков на рабочей поверхности детали, а также сплошность покрытия;
- возможность проведения ЭИЛ и поверхностного пластического деформирования (ППД) одновременно в одном технологическом цикле;
- применение нескольких проходов ЭИЛ одновременно с ППД позволяет увеличивать толщину наносимого покрытия;
- компактность и портативность оборудования, низкая энергоемкость;

- возможность проведения «сухого» и «холодного» процессов (без сквозного нагрева всей детали);
- отпадает необходимость в дополнительной термообработке;
- возможность восстанавливать детали «на месте», без их демонтажа.

Разработанные технологии и принципы моделирования архитектуры дискретных покрытий позволяют выбирать оптимальный вариант конструкции дискретной поверхности (рис. 3), подобрать режимы нанесения и материалы покрытия с учетом конкретных условий пары трения.



а – ажурные в виде опорных узлов; **б** – перфорированные в виде сетки с отверстиями; **в** – ячеистые в виде каркаса

Рисунок 3 – Покрытия дискретной структуры каркасного типа

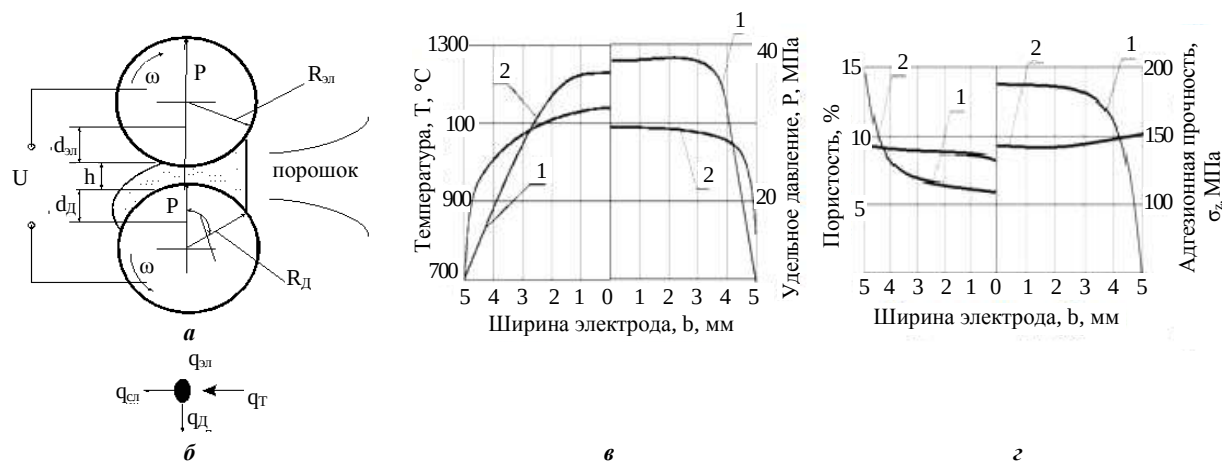
Однако существующее технологическое обеспечение дискретных покрытий позволяют использовать их в основном для упрочнения поверхностей деталей и нанесения покрытий толщиной до 1 мм. При восстановлении изношенных деталей, когда необходимо реставрировать детали и наращивать слои толщиной свыше 1 мм с высокими прочностными характеристиками, применяемое технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры не решает поставленных задач. Эти методы используются в основном при упрочнении деталей [2–5].

Цель исследований – создание нового способа восстановления валов дизель-генераторов дискретными износостойкими покрытиями методом электроконтактного припекания (ЭКП) композиционных порошков путем определения геометрических параметров дискретов за счет минимизации напряженно-деформированного состояния.

Из широкого спектра современных методов инженерии поверхностей восстанавливать детали с величиной износа более 1 мм позволяют электроконтактные методы [1]. Из всех рассмотренных способов восстановления метод электроконтактного припекания металлических порошков (ЭКПП) полностью отвечает вышеуказанным положениям и не имеет себе равных по достигаемому уровню адгезионной прочности, больших толщин покрытия (до 3 мм и более) при минимальном уровне остаточных напряжений в сравнении с наплавкой и газотермическим напылением. Электроконтактными методами получают покрытия с прочностью сцепления 150...220 МПа и пористостью до 5%. Преимуществами этих методов являются: низкая энергоемкость процесса; высокая производительность; отсутствие излучения и газоразделения; минимальные припуски на обработку [1; 6–7]. При этом температура восстанавливаемой детали не превышает 60...80 °С, отсутствует термическое коробление и поводки детали, что важно при восстановлении таких деталей, как валы. Покрытия, которые наносятся способом ЭКПП, характеризуются малой зоной термического влияния. Нанесение покрытий осуществляется в твердой фазе, температура материала покрытия находится в пределах $0,9...0,95T_{пл}$, т.е. сохраняются первоначальные свойства материала покрытия. Исследованиями электроконтактных методов нанесения покрытий посвящены разработки отечественных и зарубежных ученых в области контактной сварки, наплавки, наварки и припекания: Н.Н. Рыкалина, А.С. Гельмана, Ю.В. Клименко, А.В. Поляченко, Н.Н. Дорожкина, В.А. Верещагина, В.И. Жорника и др. [1; 6–7]. Однако в этих работах отсутствуют исследования по разработке технологии восстановления деталей типа «вал» электроконтактным припеканием дискретных покрытий (ЭКПДП).

Сущность электроконтактного припекания заключается в формировании покрытий под воздействием давления при прямом пропускании электрического тока в режиме спекания и припекания (рис. 4, а). Этот метод относится к импульсным технологиям, в основе которых лежат принципы синхронного сочетания импульсных режимов механической и электрической энергии. Он является низкоэнергоемким и высокопроизводительным методом нанесения покрытия. В то же время широкое применение метода ЭКПП ограничивается неравномерностью нагрева восстанавливаемой поверхности и наносимого материала покрытия по сечению, что приводит к ухудшению эксплуатационных свойств восстановленных деталей.

Основной недостаток технологии ЭКПП – краевой эффект, который приводит к неравномерному распределению температуры и давления по ширине электрода (рис. 4, а, б). Следствием этого является неоднородная пористость покрытия, максимальная в зонах кромки электрода, а также неравномерность адгезионной прочности со снижением ее в зоне кромки (рис. 4, в, г) [1].



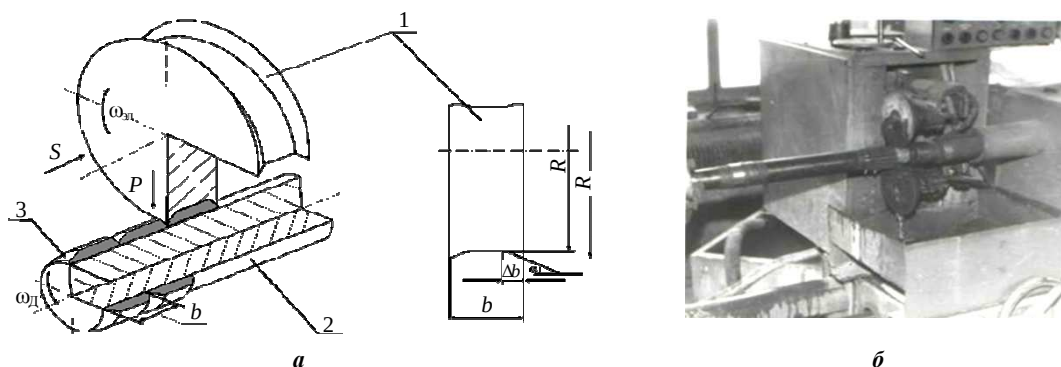
1 – сплошное покрытие; 2 – дискретное покрытие

Рисунок 4 – Физическая модель электроконтактного метода восстановления деталей типа «вал» (а, б) и распределение по ширине покрытия температуры и удельного давления (в), пористости и адгезионной прочности (г)

Нанесение покрытий дискретной структуры позволяет устранить краевой эффект, который имеет место при восстановлении деталей электроконтактным методом. Размеры и конфигурацию отдельных участков покрытия устанавливали из условия минимизации уровня напряженно-деформированного состояния при силовых воздействиях на него.

Результаты исследований. В результате проведенных исследований разработан способ восстановления валов дизель-генераторов покрытиями дискретной структуры, которые получены методом ЭКП металлических и металлокерамических порошков. Теоретически и экспериментально исследованы параметры процесса ЭКПДП (давление, удельное электросопротивление, температура). Проведено сравнение распределения давления и температуры в порошковом слое для сплошного и дискретного покрытия (см. рис. 4, а, б). Исследована износостойкость, адгезионно-когезионная прочность, пористость, микротвердость покрытий, полученных по разработанной технологии ЭКПДП (см. рис. 4, в, г).

Схема нанесения покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием (рис. 5, а) композиционных порошков реализована путем определения геометрических параметров дискретной структуры из условия минимизации напряженно-деформированного состояния. Процесс ЭКПДП осуществлялся на установке, выполненной на базе машины для шовной сварки (рис. 5, б).



P – давление на электроде; S – подача электрода; $\omega_{эл}$, $\omega_{д}$ – угловые скорости электрода и детали;
1 – электрод; 2 – деталь; 3 – покрытие

Рисунок 5 – Нанесение покрытия фасонным электродом

Для нанесения дискретного покрытия разработан электрод с трапецевидной формой сечения (см. рис. 5, а). Фасонный электрод неизбежно создает прерывистость слоя покрытия, нанося на вал покрытие в виде спирали (рис. 5, а; рис. 6, б). Это обстоятельство позволяет реализовать принцип нанесе-

ния дискретных покрытий повышенной термомеханической стойкости. При этом следует отметить две особенности: 1) дискретная структура образуется при непрерывном технологическом процессе ЭКПП; 2) дискретность структуры образуется за счет промежутка между соседними витками спирали покрытия.

Таким образом, дискретность структуры покрытия, его прерывистость образуется в направлении действия максимальных осевых напряжений, возникающих при эксплуатации вала.

Выбор геометрических параметров фасонных электродов проводится эмпирически из условий равномерной пористости и адгезионной прочности покрытия. Расчет напряженно-деформируемого состояния композиции «основа – покрытие» проводили методами численного анализа [6–8] в лицензионном конечно-элементном комплексе MSC VisualNastran for Windows 2003 [6–8]. Методика расчета напряжений заключается в построении конечно-элементной модели композиции «основа – дискретное покрытие с распределением эквивалентных напряжений по Мизесу»; задаются необходимые физико-механические свойства материалов основы и покрытия, а также граничные условия в виде силового нагружения и закрепления. Для упрощения расчетов используем модели с упорядоченной схемой расположения дискретов. Поскольку модель имеет ось симметрии, то анализ проводили для половины расчетной схемы. Количество элементов модели с электроконтактным дискретным покрытием составляет 2750, узлов – 2865. Физико-механические свойства основы: $E_o = 2$ ГПа, $\nu_o = 0,25$; покрытия: $E_n = 1,5$ ГПа, $\nu_n = 0,3$. Базовые параметры покрытия $b = 10$ мм, $h = 1,5$ мм, $d = 2$ мм (см. рис. 1) взяты согласно условиям эксплуатации, при которых покрытие работает на деформируемой основе [6–8].

Проектирование дискретного покрытия с оптимальным соотношением геометрических параметров позволяет обеспечить стойкость конструкций, которые работают в условиях высоких контактных нагрузок и трения.

Процесс получения покрытий при ЭКПДП определяется особенностями уплотнения и нагрева порошковых слоев и включает: формование (уплотнение) порошкового слоя под давлением $P \geq 10$ МПа при температуре от $T_{\text{ком}}$ до $0,1...0,2 T_{\text{пл}}$; спекание под давлением $P \geq 20...40$ МПа при пропускании электрического тока $T \leq 0,6...0,8 T_{\text{пл}}$; припекание спеченного порошкового слоя к основе при $P \geq 40...100$ МПа и $T \leq 0,8...0,9 T_{\text{пл}}$.

Материал покрытия выбирали с учетом его работы в композитной системе «материал покрытия – материал основы». При выборе материалов основы и покрытия учитывали способность их адгезионного взаимодействия. Важным условием работоспособности композитной системы «материал покрытия – материал основы» является согласуемость термомеханических характеристик материала детали и материала покрытия. Материал детали и материал покрытия должны иметь минимальную разницу коэффициентов термического расширения и максимальную прочность сцепления между собой, т.е. система «покрытие – деталь» должна иметь эксплуатационную совместимость. Научно-технологической основой выбора материала покрытия являлось, с одной стороны, установление физико-химической согласованности в системе «покрытие – основа», с другой – установление взаимосвязи в системе «технология – состав – структура – свойства». В случае если состав порошкового материала для покрытия задан, на первый план выходят три основных критерия: 1) энергонасыщенность; 2) формуемость порошкового материала; 3) оптимальные температурно-временные режимы процесса получения покрытия, формирующие такое его структурно-фазовое состояние, которое обеспечивает заданные функциональные свойства изделия.

В качестве материала покрытия в исследовании использовали:

1) композицию «карбид хрома – никель» в разном процентном соотношении в виде механической смеси порошков ($70...90\% \text{Cr}_2\text{C}_3 + 10...30\% \text{Ni}$) дисперсностью 40 мкм; и карбид хрома Cr_3C_2 ($70...90\%$) с нихромом (Ni–Cr 80/20);

2) композиционный материал КХН 15 ($85\% \text{Cr}_2\text{C}_3 + 15\% \text{Ni}$) и КХН 30 ($70\% \text{Cr}_2\text{C}_3 + 30\% \text{Ni}$) в виде порошка дисперсностью 40...100 мкм.

Осуществлена оптимизация и разработаны математические модели технологического процесса восстановления ЭКПДП. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан технологический процесс восстановления валов дизель-генераторов ЭКПДП (табл. 1).

Таблица 1 – Маршрут восстановления валов дизель-генераторов

№ операции	Наименование операции	Содержание операции
005	Моечная (моечная камера ОМ-1418А)	Очистить деталь от грязи и коррозии
010	Дефектовочная (стол дефектовочный)	Определить величину износа поверхности детали
015	Круглошлифовальная (круглошлифовальный 3А151)	Шлифовать дефектную поверхность
020	ЭКПП (установка для ЭКПП 011-1-02)	Нанести покрытие на изношенную поверхность
025	Контрольная (стол контрольный)	Контролировать восстановленную поверхность на наличие сколов, трещин, толщину покрытия
030	Круглошлифовальная (круглошлифовальный 3А151)	Шлифовать поверхность с покрытием
035	Контрольная	Контролировать восстановленную поверхность

Результаты стендовых испытаний распределительных валов дизель-генераторов (рис. 6, а) с покрытиями дискретной структуры (рис. 6, б) представлены в таблице 2. Прочность сцепления их с основной составляет 180...220 МПа. Толщина покрытий – 0,1...3 мм. Твердость покрытия задавалась твердостью его материала, которая сохраняет свою величину в материале покрытия (принцип технологической наследственности П.И. Ящерицына) и может находиться в пределах 55...62 HRC. Ресурс деталей увеличился в 4...10 раз. Получение качественного покрытия возможно только при поддержании требуемого соотношения между температурой процесса и величиной прикладываемого давления.



а – участки распределительных валов дизель-генераторов с покрытиями дискретной структуры;
б – с покрытиями, полученными электроконтактным методом (материал вала – сталь 45)

Рисунок 6 – Распределительный вал 150.03.022-1 дизель-генератора 6ЧН 12/14

Таблица 2 – Результаты стендовых испытаний

Способ восстановления вала	Среднее значение износа, мм	
	вал	штулка
Электроконтактное припекание покрытий дискретной структуры	0,03...0,035	0,08
Вибродуговая наплавка	0,04...0,045	0,07
Новая деталь	0,05...0,08	0,09

Технологию электроконтактного припекания дискретных покрытий целесообразно использовать для следующих целей:

- восстановления и упрочнения деталей узлов трения (осей валиков, коленчатых валов, направляющих) и посадочных мест под подшипники в корпусах и на валах транспортных средств;
- упрочнения и восстановления шеек коленчатых, распределительных валов роторов газоперекачивающих агрегатов, балансиров опорных катков гусеничных машин, пальцев, деталей типа «вал» спецтехники и авиационной техники, деталей двигателей внутреннего сгорания;
- восстановления шеек валов, особенно валов импортных, дорогостоящих и редких при увеличении срока их эксплуатации в 2...3 раза путем замены многослойной наплавки на электроконтактное припекание порошковых материалов.

Нанесение покрытий дискретной структуры позволяет решить основное противоречие, возникающее при использовании сверхтвердых поверхностных слоев – преодолеть их хрупкость. В слоях дискретной структуры обеспечивается ограничение роста напряжений и процесса трещинообразования, что многократно повышает их прочность и долговечность, полностью исключая их когезионное растрескивание и адгезионное отслоение. Дискретные участки твердого износостойкого материала обеспечивают высокий коэффициент трения [2; 3].

Покрытия дискретной структуры позволили по-новому подойти к технологии восстановления изношенных деталей. Особенностью большинства изношенных деталей является локальный характер и неравномерность износа. Исходя из этого разработана технология восстановления путем нанесения дискретного покрытия переменной толщины в соответствии с эпюрой неравномерного износа. Дискретная структура покрытия позволяет (в отличие от традиционного сплошного покрытия) успешно применять поверхностное пластическое деформирование (ППД) до получения необходимого размера детали и шероховатости поверхности. Режимы ППД обеспечивают заданный размер и шероховатость поверхности. Полностью отпадает необходимость финишной механической обработки. Применение ППД проводится одновременно с нанесением дифференциального дискретного покрытия. Это является третьей особенностью технологии восстановления. Применение ППД для традиционных сплошных покрытий невозможно из-за их растрескивания и отслоения. Дискретные покрытия могут обрабатываться ППД до пластической деформации глубинных слоев без растрескивания и отслоения отдельных дискретных участков покрытия. Восстановление и упрочнение может реализовываться дискретными покрытиями переменной сплошности. В основу выбора величины сплошности положены зависимость износостойкости от сплошности [9]. Нанесение дискретного покрытия переменной сплошности в соответствии с эпюрой износа осуществляется путем изменения скорости перемещения инструмента (электрода).

Заключение. Исследование восстановления валов дизель-генераторов электроконтактным припеканием дискретных покрытий позволило получить следующие результаты:

1) выполнено научное обоснование целесообразности применения электроконтактного припекания металлических порошков их смесей для нанесения износостойких покрытий дискретной структуры как для ремонта и восстановления, так и при изготовлении новых деталей, включающее комплексное решение задач установления их прочностных и эксплуатационных свойств и разработки технологического процесса нанесения;

2) впервые предложен способ восстановления валов дизель-генераторов, заключающийся в нанесении дискретных композиционных покрытий с повышенной адгезионной прочностью и толщиной электроконтактным припеканием порошковых материалов, который обеспечивает повышенный уровень физико-механических свойств рабочих поверхностей;

3) установлены преимущества ЭКПП дискретной структуры по сравнению со сплошной: устранение краевого эффекта и, как следствие, равномерное уплотнение, нагрев порошковых слоев и получение покрытий с равномерными свойствами;

4) путем моделирования напряженно-деформированного состояния системы «композиционное порошковое покрытие – деталь» установлены оптимальные геометрические параметры дискретов, обеспечивающие максимальные адгезионно-когезионную прочность при минимальном уровне остаточных напряжений [6–7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Лопата, Л.А. Совершенствование технологии восстановления деталей типа «вал» электроконтактным припеканием металлических порошков / Л.А. Лопата, М.В. Красота // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр. / под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Новополоцк: ПГУ, 2001. – С. 300–303.
2. Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью / Б.А. Ляшенко [и др.]. – Киев, 1984. – 57 с. – Препр. / АН УССР. ИПП.
3. Ляшенко, Б.А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов // Технологические системы. – 2001. – № 4. – С. 17–25.
4. Технологическое обеспечение вакуум-плазменных покрытий дискретной структуры / Е.К. Соловых [и др.] // Технологические системы. – 2007. – № 2. – С. 22–27.
5. Оптимизация дискретных структур электроискровых покрытий / Б.А. Ляшенко [и др.] // Артиллерийское и стрелковое вооружение: междунар. науч.-техн. сб. – Киев, 2004. – Т. 4(13). – С. 30–34.
6. Лопата, Л.А. Получение износостойких дискретных покрытий электроконтактным припеканием / Л.А. Лопата, Б.А. Ляшенко, В.И. Калиниченко // Проблемы трения и изнашивания: науч.-техн. сб. – Киев: НАУ, 2009. – № 51. – С. 139–148.
7. Ляшенко, Б.А. Повышение износостойкости деталей судовых машин и механизмов покрытиями дискретной структуры. Технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием / Б.А. Ляшенко, Л.А. Лопата // Проблемы трения и изнашивания. – 2015. – № 2(67). – С. 110–126.
8. Агеев, М.С. Восстановление валов судовых дизельных генераторов электроконтактным припеканием покрытий дискретной структуры / М.С. Агеев, С. Л. Чиграй // Современные энергетические установки на транспорте, технологии и оборудование для их обслуживания СЭУТОО-2015: материалы 6-й междунар. науч.-техн. конф.; Херсон. гос. морская акад. – Херсон, 2015. – С. 262–263.
9. Восстановление деталей машин дифференциальными покрытиями дискретной структуры / Б.А. Ляшенко [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2001. – № 2. – С. 21–23.

Поступила 26.01.2016

RESTORATION OF TREES DIESEL-GENERATORS ELECTROCONTACT SINTERING DISCRETE COATING

Y. VOLKOV, V. LOPATA, T. VIGERINA, M. AGEEV

Ways to improve resource trees as the most expensive parts sufficiently studied, worked and continue to improve. However, despite the large amount of the research and experimental work carried out to date, the problem of increasing resource shafts diesel generators remains highly relevant. A method for the recovery and strengthening of the shafts of diesel generators electrocontact discrete coating and sintering process flow diagram for its implementation. Alternative coatings discrete structure increases the carrying capacity of the coatings. Using reconstructed trees can reduce the cost of repair companies for spare parts, save a large amount of metal.

Keywords: covering a discrete structure with electro-sintering, wear resistance, stress-strain state, and wear-resistant coatings, shaft diesel generators.

УДК 621.793.14

**ТЕРМОБАРИЧЕСКОЕ СПЕКАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ
И ТИТАНОМ АЛМАЗНЫХ МИКРОПОРОШКОВ**

*канд. техн. наук В.Т. СЕНЮТЬ; д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК;
А.М. ПАРНИЦКИЙ; Е.И. МОСУНОВ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты спекания в аппарате высокого давления микропорошков алмаза после их предварительного модифицирования титаном и кремнием. В результате модифицирующего отжига в защитной атмосфере получены композиционные алмазные микропорошки алмаз – титан и алмаз – кремний. Показано, что в ходе термобарического спекания модифицированных алмазных микропорошков образуется высокоплотный компактный сверхтвердый поликристаллический материал, по границам алмазных зерен которого формируется керамическое связующее на основе карбидов кремния и титана.

Ключевые слова: модифицированные алмазные микропорошки, шихта, алмазные зерна, термобарическое спекание, поликристаллический материал, наноструктурные покрытия.

Введение. Традиционными методами получения поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) на основе алмаза являются как спекание алмазных микропорошков в условиях высоких давлений и температур без использования активирующих добавок, так и спекание в присутствии каталитически активных и тугоплавких металлов [1; 2]. Данные методы получения алмазных поликристаллов реализуются, как правило, при сверхвысоких давлениях 7...12 ГПа, что делает их производство существенно дороже.

Поиск новых научных подходов и технологических решений, позволяющих добиться снижения давления спекания и, следовательно, себестоимости алмазных поликристаллических материалов и улучшения их эксплуатационных характеристик – одна из актуальных задач в области синтеза новых алмазных материалов. Исключение металлических примесей, катализирующих обратное превращение алмаз – графит, а также использование в качестве связующих компонентов микро- и нанопорошков тугоплавких соединений на основе карбидов, нитридов, боридов и др. позволяет активировать процесс спекания и существенно улучшить физико-механические характеристики синтезируемых алмазных композиционных и поликристаллических материалов [3].

Для прочного связывания зерен алмаза необходимо, чтобы связка имела хорошую адгезию с поверхностью алмаза. Как показано в [4], смачивание алмаза наблюдается в том случае, если расплавленный металл интенсивно реагирует с углеродом и образует карбиды. Таким образом, в качестве связки при спекании алмазных поликристаллов могут быть использованы карбидообразующие элементы в чистом состоянии или в составе сплава, в котором присутствует некарбидообразующий элемент. Кремний традиционно используется как активирующая спекание алмаза добавка, он обладает хорошей жидкотекучестью, в расплавленном состоянии интенсивно реагирует с углеродом с образованием тугоплавкого карбида, обладающего низким коэффициентом термического расширения и высокой твердостью [5]. Введение добавок кремния в шихту на основе порошков алмаза приводит к формированию тугоплавких соединений (карбида кремния) в системе углерод – кремний при термобарической обработке, что способствует спекаемости зерен сверхтвердых материалов при более низких давлениях. Карбидообразующий элемент титан традиционно используют при получении алмазосодержащих композитов и поликристаллов для повышения удержания алмазов в матрице или улучшения спекаемости алмазных зерен.

Изучение структуры сверхтвердого поликристаллического материала на основе микропорошков алмаза после их модифицирования активирующими добавками (кремний, титан) и спекания в условиях высоких давлений, не превышающих 6 ГПа, является целью данной работы.

Оборудование, материалы и методики исследований. Термобарическую обработку шихты на основе микропорошков алмаза выполняли в аппарате высокого давления (АВД) «наковальня с лункой» при давлении 5...6 ГПа в диапазоне температур 1600...2000 °С. В качестве среды, передающей давление, служил контейнер из литографского камня, внутри которого помещался трубчатый графитовый нагреватель с исследуемым материалом. Для оценки уровня давления в камере синтеза использовали метод калибровки при комнатной температуре, основанный на сопоставлении усилия пресса и давления полиморфного превращения в реперном веществе, в качестве которого применяли висмут (Bi). Контроль температуры проводили с помощью хромель-алюмелевой и платина-платинородиевой термопар. Для управления заданными параметрами синтеза и спекания сверхтвердых материалов использовался контроллер, разработанный на базе PC-совместимой промышленной рабочей станции со встроенным графическим LCD-дисплеем и клавиатурой.

Рентгеновские исследования порошков выполнены на дифрактометре фирмы “Bruker” D8 ADVANCE в $\text{Cu-K}\alpha$ -излучении в автоматическом режиме съемки. Полуколичественный фазовый анализ (S-Q) проводился с использованием корундового числа RIR (Reference Intensity Ratio). Структурные исследования исходных микропорошков и спеченных композитов осуществляли на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором «INCA Energy 350». Изучение элементного состава порошков и композитов осуществляли методом МРСА.

На атомно-силовом микроскопе NT-206 (ОДО «МикроТестМашины», Беларусь) в контактном режиме исследовали морфологию поверхности и излома полученных образцов.

В качестве исходных материалов использовали микропорошки алмазов статического синтеза АСМ 1/0, АСМ 14/10 и АСМ 20/14 производства ЗАИ «ПО «Кристалл» (г. Гомель).

Плотность полученных поликристаллических образцов измеряли методом гидростатического взвешивания в четыреххлористом углероде на аналитических весах модели ВЛР-200г (ГОСТ 24104-2001).

Микротвердость исследуемых образцов измеряли на микротвердомере «Micromet-II» со стандартным индентором Виккерса. Измерения осуществляли путем вдавливания в поверхность образца алмазной четырехгранной пирамидки с углом при вершине 136° по ГОСТ 9450-76 и нагрузкой 1 кг. Твердость определяли по общепринятой формуле:

$$HV = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (1)$$

где P – нагрузка на индентор; d – среднее арифметическое двух диагоналей отпечатка.

Спекание в условиях высоких давлений и температур микропорошков алмаза, модифицированных кремнием. Улучшение эксплуатационных свойств алмазных поликристаллов достигается за счет исключения металлических примесей и снижения содержания в исходной шихте активаторов спекания, а также за счет использования кремния в качестве связующего компонента [6]. Недостатками поликристаллического материала, получаемого по данному способу, являются его низкая твердость из-за избытка кремния (8...15% массы шихты) и неоднородность свойств по объему. Получить однородную структуру материала в этом случае проблематично, а повышение давления спекания свыше 9 ГПа технически сложно реализовать в образцах приемлемых размеров. Кроме того, ввиду неоднородности структуры не исключено образование в материале микротрещин. Альтернативная технология получения композиционных алмазных материалов реализуется путем создания порошков – композитов на основе порошков алмаза со слоистым нанопокрывом $\text{Si} + \text{C}$ с последующей пропиткой пористого алмазного каркаса жидким кремнием [7]. В этом случае композиционный материал характеризуется однородной структурой и высокими прочностными характеристиками, которые достигаются благодаря синтезированным *in situ* наноразмерным пленкам SiC в аморфном состоянии.

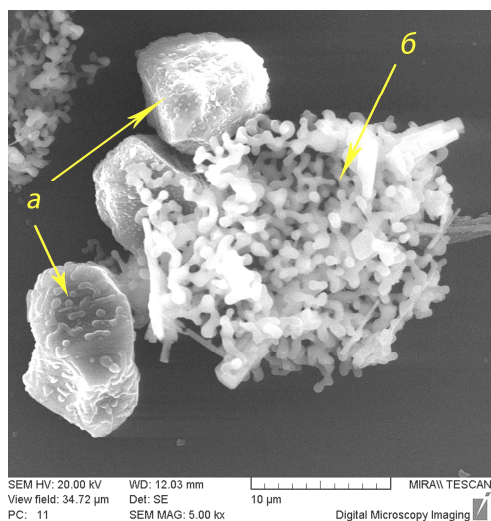
В работах [8; 9] было показано, что модифицирование кремнием алмазных нанопорошков позволяет снизить содержание свободного кремния при термобарической обработке и способствует более равномерному распределению наноструктурного SiC в композиционном материале. В работах [10; 11]

разработан процесс модифицирования кремнием микропорошков алмаза путем их высокотемпературного отжига в парах кремнийсодержащих соединений.

В ходе подготовки к термобарическому спеканию модифицирующий отжиг алмазных порошков АСМ 20/14 и АСМ 14/10 проводили в герметичном контейнере в парах кремнийсодержащих соединений при температуре 950°C и изотермической выдержке в течение 3 ч. При этом содержание кремния в шихте после отжига составляет 10 мас. % от массы алмазов. На рисунке 1 показан внешний вид алмазного порошка после силицирования.

Анализ морфологии модифицированных алмазных порошков показал, что кремний адсорбируется на поверхности алмазных зерен в виде частиц округлой (каплевидной) формы размером 100...200 нм, которые в процессе роста объединяются в сплошную пленку, частично либо полностью покрывающую алмаз (см. рис. 1). Кроме того, кремний в шихте образует отдельные дендритные агломераты размерами до 5 мкм, которые состоят из частиц размером 200...800 нм.

Последующее термобарическое спекание модифицированного кремнием алмазного микропорошка проводили при давлении 5,5 ГПа. Спеченный материал характеризуется



а – алмазные зерна, покрытые кремнием;
б – дендритные агломераты кремния

Рисунок 1 – Внешний вид микропорошка АСМ 14/10 + Si

однородной структурой, при этом связка в виде прослоек кремния и карбида кремния равномерно распределена между алмазными зёрнами и имеет хорошую адгезию с поверхностью алмаза. Однако полученный при данных параметрах термобарического спекания ПСТМ характеризуется повышенной хрупкостью, что возможно связано с недостаточным содержанием карбида кремния, который образуется в ходе реакции кремния с углеродом. Увеличение длительности изотермической выдержки и повышение температуры спекания при данном давлении приводит к графитизации алмаза и снижению плотности материала. Плотность полученных поликристаллов составляет $3,3...3,35 \text{ г/см}^3$, микротвердость находится в диапазоне значений $38...50 \text{ ГПа}$.

Повышение микротвердости поликристаллического материала в данном случае следует ожидать за счет оптимизации технологии модифицирования алмазных микропорошков и предварительного формирования на их поверхности наноструктурного покрытия на основе карбида кремния [7], а также за счет увеличения содержания кремния на исходных микропорошках и, соответственно, SiC в спекленном материале.

Спекание в условиях высоких давлений микропорошков алмаза, модифицированных титаном. Снижение давления спекания алмазных поликристаллов может быть достигнуто за счет термобарической обработки смеси алмазного порошка с добавками, выбранными из ряда металлов VIII группы, а также титана, молибдена и других, содержание которых в смеси составляет $6...50 \text{ мас.}\%$ [1; 12]. Недостатком получаемых по этой технологии поликристаллов является повышенное содержание в них металлических примесей, которые способствуют интенсивной графитизации алмаза при довольно низких температурах порядка 700°C , снижая эксплуатационные свойства материала. Для снижения количества металлических примесей в материале необходимо обеспечить полное связывание металла в карбид, в данном случае титана, что может быть достигнуто как оптимизацией режимов термобарической обработки, так и за счет формирования на поверхности алмазных зёрен наноструктурного титанового покрытия, что особенно актуально при спекании высокодисперсных порошков алмазов [8].

Для спекания использовали микропорошки алмаза статического синтеза ACM 14/10 и ACM 1/0. Термобарическую обработку (спекание) алмазных порошков осуществляли при давлении $5,5...6,0 \text{ ГПа}$ в диапазоне температур $1600...2000^\circ\text{C}$.

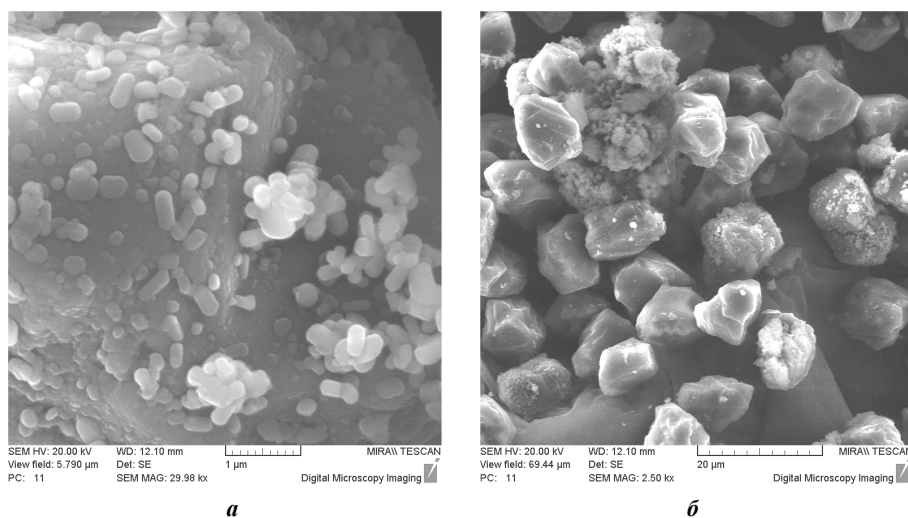
Модифицирование порошков алмаза осуществляли путем их отжига в защитной хлорсодержащей атмосфере в герметичном контейнере в присутствии дигидрида титана. Температура модифицирования составила 900°C при длительности 2 ч. В результате нагрева при температурах выше 300°C происходит разложение дигидрида титана с образованием свободного титана по реакции:



Далее при температурах выше 600°C происходит образование метастабильных хлоридов титана, в частности образуется тетрахлорид титана:



Метастабильные хлориды титана разлагаются с выделением свободного титана на поверхности алмаза в виде частиц округлой и продолговатой формы со скругленными гранями, имеющих в основном размер в пределах $100...600 \text{ нм}$ (рис. 2). На некоторой части алмазных зёрен покрытие сформировано в виде «шубы», практически полностью покрывающей поверхность алмаза.



а – алмазные зёрна, покрытые кремнием; **б** – дендритные агломераты кремния;

Рисунок 2 – Внешний вид алмазных зёрен ACM 14/10 после модифицирования титаном

После операции модифицирования микропорошков алмаза титаном проводили их термобарическую обработку. Порошок АСМ 14/10 спекали под давлением 5 ГПа, а более мелкий порошок АСМ 1/0 – под давлением 6 ГПа. На рисунке 3 представлена микроструктура изломов полученных поликристаллов.

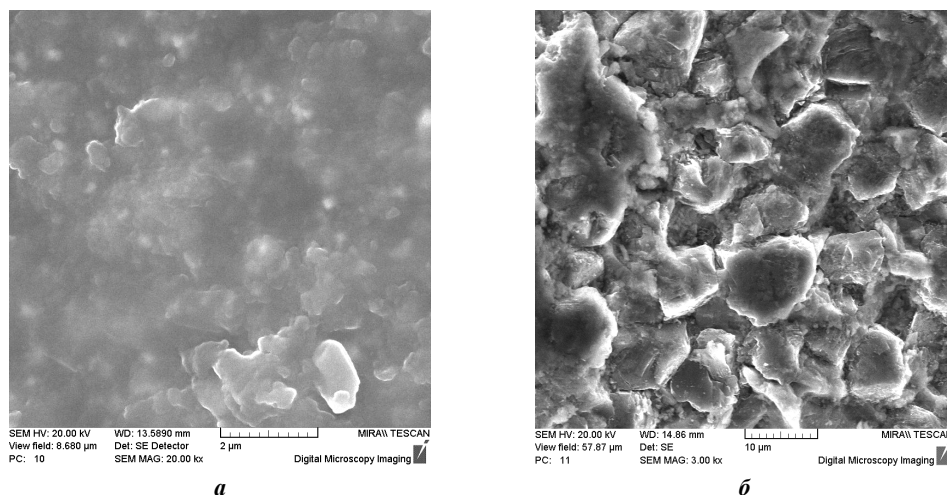


Рисунок 3 – Микроструктура алмазных поликристаллов на основе синтетических алмазных порошков марки АСМ 1/0 (а) и АСМ 14/10 после модифицирования Ti (б)

Спеченные материалы имеют поликристаллическое строение без видимых крупных пор и несплошностей. По границам зерен алмаза выделяются тонкие прослойки фаз на основе соединений титана.

Плотность поликристаллических сверхтвёрдых материалов в зависимости от температуры спекания находится в пределах 3,38...3,46 г/см³. Ввиду высокой твердости спеченных материалов точно измерить длину диагонали отпечатка индентора для поликристаллов с максимальной плотностью не удалось; ориентировочно микротвердость ПСТМ, полученных как из микропорошка АСМ 1/0, так и из микропорошка АСМ 14/10 составляет не менее 70 ГПа.

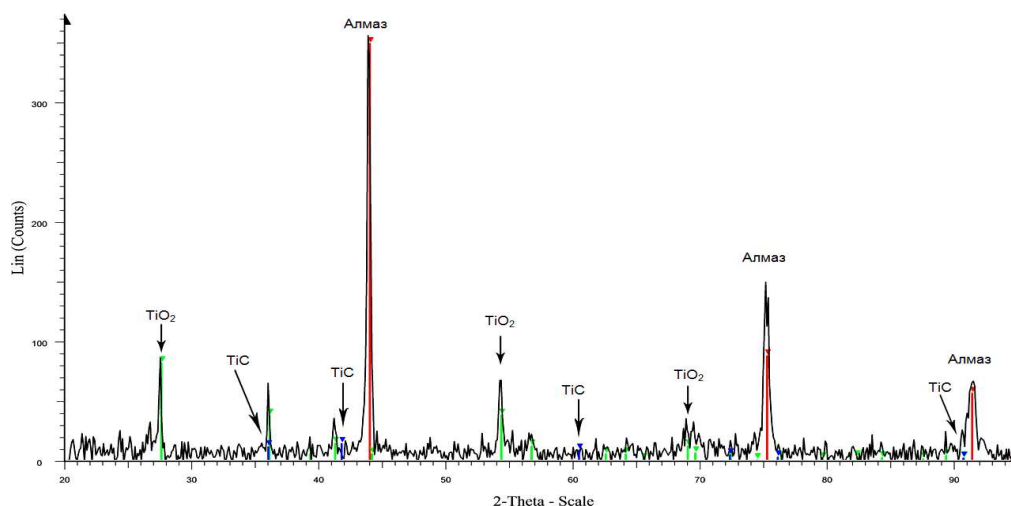


Рисунок 4 – Дифрактограмма композита, полученного из синтетического алмазного порошка АСМ 1/0 после модифицирования Ti и термобарического спекания. Давление спекания – 6 ГПа, температура – 2000 °С, время выдержки – 20 с

Рентгеноструктурные исследования ПСТМ на основе микропорошка АСМ 1/0 (рис. 4) показали, что кроме алмаза в спеченном материале присутствуют карбид и оксид титана. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) алмаза составляет около 50 нм, ОКР TiC и TiO₂ находится в пределах 100...120 нм. Образование оксида титана TiO₂ может быть объяснено частичным окислением титана в процессе модифицирования, а также при термобарическом спекании в ходе взаимодействия титана с кислородом, адсорбированным поверхностью алмазного микропорошка. Важно отметить, что в диапазоне давлений и температур, в котором осуществляли спекание, не происходит сильной графитизации алмаза (на рентгенограмме фиксируются только «следы» графита), что определяет высокую микротвердость полученного материала.

Закключение. Анализ морфологии алмазных микропорошков после их модифицирования кремнием показал, что кремний адсорбируется на поверхности алмазных зерен в виде частиц округлой (капельной) формы размерами 100...200 нм, которые в процессе роста объединяются в сплошную пленку, частично либо полностью покрывающую алмаз. Кроме того, кремний образует дендритные агломераты размерами до 5 мкм, которые состоят из отдельных ограненных частиц размерами 200...800 нм. Композиционный материал, спеченный под давлением 5,5 ГПа на основе модифицированного кремнием алмазного порошка, характеризуется однородной структурой, при этом связка в виде тонких прослоек равномерно распределена между алмазными зернами. Модифицирование микропорошков алмаза титаном позволяет проводить их термобарическое спекание при более низком давлении без графитизации алмаза. Это определяет высокую микротвердость поликристаллических сверхтвердых материалов, что наряду с высокодисперсной структурой материала позволяет использовать его в лезвийном инструменте для обработки твердых сплавов, керамики, других труднообрабатываемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Г.П. Богатырева [и др.]; под ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.
2. Шульженко, А.А. Поликристаллические сверхтвердые материалы в режущем инструменте. Ч. 1 / А.А. Шульженко, С.А. Клименко // Инструментальный свет. – 1999. – № 4. – С. 14–16.
3. Витязь, П.А. Синтез и применение сверхтвердых материалов / П.А. Витязь, В.Д. Грицук, В.Т. Сенють. – Минск: Белорус. наука, 2005. – 359 с.
4. Голубев, А.С. Нитрид бора. Структура, свойства, получение / А.С. Голубев, А.В. Курдюмов, А.Н. Пилянкевич. – Киев: Наук. думка, 1987. – 200 с.
5. Курдюмов, А.В. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора / А.В. Курдюмов, А.Н. Пилянкевич. – Киев: Наук. думка, 1979. – 188 с.
6. Способ получения композиционного материала из алмаза и карбида кремния: пат. РФ № 1729086 / А.А. Шульженко, Г. А. Воронин, А.С. Осипов; дата публ.: 27.11.1995.
7. Структурообразование карбидокремниевой матрицы в композиции «алмаз – карбид кремния» / В.Н. Ковалевский [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. – 2005. – № 5. – С. 8–14.
8. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.]; под ред. П.А. Витязя. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 381 с.
9. Сенють, В.Т. Влияние модифицирования наноалмазов на структурные характеристики спеченных на их основе в условиях высоких давлений и температур сверхтвердых композитов / В.Т. Сенють // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 3. – С. 43–52.
10. Сверхтвердый композиционный материал на основе алмазов после модифицирования кремнием / В.Т. Сенють [и др.] // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности: материалы 14-й междунар. науч.-техн. семинара, г. Свалява, 24–28 февр. 2014 г. – Киев: АТМ Украины, 2014. – С. 211–213.
11. Получение композитов на основе алмазного микропорошка, модифицированного Si / В.Т. Сенють [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 11-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 мая. 2014 г. / Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2014. – С. 263–264.
12. Способ получения поликристаллического алмазосодержащего материала: пат. РФ № 2065834 / В.Б. Ракицкий, В.В. Ничипор, С.Н. Малышев; дата публ.: 27.08.1996.

Поступила 22.01.2016

THERMOBARIC SINTERING OF DIAMOND MICROPOWDERS MODIFIED BY SILICON AND TITANIUM

V. SENYUT, V. ZHORNIK, A. PARNITSKY, E. MOSUNOV, A. DUDAN

The results of the sintering of micropowders of diamond in a high pressure apparatus after their prior modification by titanium and silicon are presented. As a result of the modifying annealing in a protective atmosphere the composite diamond micropowders such as diamond – titanium and diamond – silicon are obtained. It is shown that during the thermobaric sintering of the modified diamond powders high-density compact superhard polycrystalline material is obtained, in which along the diamond grain boundaries ceramic binder based on silicon carbide and titanium carbide is formed.

Keywords: modified diamond micropowders, charge, diamond grain, thermobaric sintering, polycrystalline material, nanostructured surface.

УДК 621.793:621.785.793

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НАПЫЛЕНИЯ И ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ 95X18

**А.Н. ГРИГОРЧИК; д-р физ.-мат. наук, доц. В.А. КУКАРЕКО;
д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);
д-р техн. наук, проф. А.В. БЕЛЫЙ
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)**

Исследуется влияние параметров напыления и ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние, дюрометрические и триботехнические характеристики газотермического покрытия из высокохромистой стали 95X18. Показано, что в результате ионной обработки при 670...890 К на поверхности покрытия формируются модифицированные азотом слои глубиной от 3...5 до 15...20 мкм. Ионная обработка приводит к образованию на поверхности покрытия твердого раствора γ'_N -(Fe, Cr) и выделению частиц CrN. В процессе триботехнических испытаний в условиях сухого трения в поверхностных слоях газотермического покрытия происходит деформационно-активированное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение, приводящее к значительному возрастанию износостойкости и микротвердости покрытия. Показано, что в результате ионно-лучевого азотирования микротвердость покрытий из стали 95X18 возрастает в 1,7...2,5 раза, а износостойкость в 2,3...4,6 раза по сравнению с необработанным покрытием.

Ключевые слова: газотермическое покрытие, метастабильный аустенит, ионно-лучевое азотирование, сухое трение, деформационно-активированное превращение.

Введение. Требования к функциональным свойствам узлов трения современных машин постоянно возрастают. В связи с этим возникает необходимость в повышении триботехнических и дюрометрических характеристик материалов использующихся в узлах трения.

Одними из перспективных материалов для изготовления пар трения, являются газотермические покрытия. В частности, современный метод гиперзвуковой металлизации обеспечивает высокую производительность напыления и низкую пористость получаемого покрытия (~ 2...5%) [1]. Вместе с тем невысокие прочностные характеристики гиперзвуковых газотермических покрытий не позволяют использовать их в высоконагруженных узлах трения. В целях повышения триботехнических свойств и противозадирной стойкости, гиперзвуковых газотермических покрытий, целесообразно использовать методы инженерии поверхности и, в частности, метод ионно-лучевого азотирования, придающий поверхностным слоям высокую микротвердость и износостойкость. Однако до настоящего времени нет систематизированных данных о структурно-фазовых превращениях и триботехнических характеристиках гиперзвуковых газотермических покрытий из высокохромистых проволоочных сталей, содержащих большое количество метастабильного аустенита [2]. Ввиду этого задачей настоящей работы выступает исследование структурно-фазового состояния, а также дюрометрических и триботехнических характеристик покрытий из высокохромистой стали 95X18, полученных с использованием различных режимов напыления и подвергнутых ионно-лучевому азотированию.

Методики проведения исследований. Исследовалось газотермическое покрытие из проволоочной стали 95X18 (табл. 1), нанесенное методом гиперзвуковой металлизации по различным режимам (табл. 2). Для получения газотермического покрытия использовалась установка АДМ-10, разработанная в ОИМ НАН Беларуси [1]. Скорость полета напыляемых частиц составляла 400...500 м/с, размер частиц 5...40 мкм.

Таблица 1 – Химический состав распрыскиваемой проволоки из стали 95X18

Марка проволоочной стали	Концентрация элементов, мас. %									
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	P	S	Cu	Fe
95X18	0,9...1,0	17,0...19,0	0,60	0,20	0,80	0,80	0,030	0,025	0,30	основа

Таблица 2 – Режимы гиперзвукового напыления покрытия из стали 95X18

Режим напыления	Сила сварочного тока, А
Режим 1	95
Режим 2	165
Режим 3	210
Режим 4	265

Ионно-лучевое азотирование образцов покрытий осуществлялась на экспериментальной установке ФТИ НАН Беларуси с помощью ионного источника УВН-2М с замкнутым дрейфом электронов [2]. Пучок содержал около 70% ионов молекулярного азота и 30% ионов атомарного азота. Для однородного распределения ионного пучка по обрабатываемой поверхности применялась система механического сканирования узла крепления образцов, которая обеспечивала равномерность дозы облучения не менее 93 %. Имплантация проводилась в течение 2-х часов при энергии ионов 1...3 кэВ и плотности ионного тока 2 мА/см². Флюенс легирования образцов покрытий составлял $\sim 3 \cdot 10^{19}$ см⁻². Температура азотирования образцов гиперзвуковых газотермических покрытий составляла 670, 770 и 890 К. Контроль температуры осуществляется с помощью термопары ТПП.

Образцы для структурно-фазовых исследований (10×6×5 мм) вырезались из пластин (100×50×6 мм), изготовленных из стали 45 с напыленным слоем из проволоочной стали 95X18. Перед рентгеновской съемкой и измерением твердости проводилось шлифование образцов покрытия в исходном состоянии на наждачной бумаге с размером зерна 18...24 мкм.

Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ. Травление образцов газотермического покрытия, прошедших ионно-лучевое азотирование, осуществлялось в реактиве Куррана (50 мл HCl; 10 г CuSO₄; 50 мл H₂O). Пористость газотермических покрытий определялась на нетравленной поверхности шлифа методом проведения секущих прямых при увеличении ×100.

Рентгеновская съемка осуществлялась на дифрактометре ДРОН-3, в монохроматизированном CoK_α-излучении. Запись дифракционных линий осуществлялась в режиме сканирования. Шаг сканирования составлял 0,1°, время набора импульсов в точке 10 с.

Триботехнические испытания осуществлялись по схеме возвратно-поступательного передвижения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения 0,1 м/с в режиме трения без смазочного материала (удельная нагрузка испытаний составляла $p = 1,5$ МПа). При испытаниях использовалось контртело с размерами 90×40×5 мм, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV 10). Измерение величины износа призматических образцов осуществлялось весовым методом с использованием аналитических весов АДВ-200М. Погрешность измерения массы образца составляла 0,05 мг. Путь трения составлял ≈ 1200 м.

Измерения твердости по Виккерсу проводились на твердомере ТП при нагрузке на индентор $P = 30$ кг. Измерение микротвердости проводились на твердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор $P = 25$ г.

Результаты исследований. Напыленное покрытие имело толщину $\sim 0,8...1,0$ мм. Гиперзвуковая металлизация, для которой характерна сверхзвуковая скорость полета расплавленных частиц (≈ 500 м/с), приводит к формированию плотного покрытия с остаточной пористостью, не превышающей $\sim 3...5\%$, и высоким содержанием оксидов на границах напыленных частиц.

На основании данных рентгеноструктурного анализа было рассчитано содержание метастабильного остаточного аустенита в покрытии после механической шлифовки, а также после электрополировки для каждого режима напыления (табл. 3). Глубина электрополировки составляла $\sim 0,1$ мм.

Таблица 3 – Содержание остаточного аустенита и дюрометрические характеристики покрытия из высоколегированной стали 95X18 после различных режимов газотермического напыления

Режим напыления покрытия из стали 95X18	Содержание остаточного аустенита V_{γ} , %		Твердость, HV 30	Микротвердость, HV 0,025
	механическая шлифовка	электрополировка		
Режим 1	35	54	350	580
Режим 2	68	71	315	450
Режим 3	55	65	320	510
Режим 4	60	68	320	500

Из данных рентгеноструктурного анализа можно видеть, что при различных режимах напыления в покрытии из высоколегированной стали 95X18 содержится разное количество γ -фазы. В частности, при напылении по режиму 1 (95 А) в покрытии содержится минимальное количество остаточного аустенита (54 об. %), при этом твердость покрытия составляет 350 HV 30 (см. табл. 3). Увеличение силы сварочного тока при напылении до 165-265 А (режимы 2, 3 и 4) приводит к формированию покрытий с 65...71 об. % остаточного аустенита (см. табл. 3). При этом твердость покрытий составляет 315-320 HV 30.

Таким образом, увеличение силы сварочного тока при напылении до 165...265 А приводит к увеличению содержания в газотермическом покрытии метастабильного остаточного аустенита и снижению его твердости, о чем свидетельствуют данные таблицы 3. Минимальное содержание аустенита в покрытии достигается при силе сварочного тока 95 А.

Аномально высокое содержание γ -фазы в покрытии из стали 95X18 связано с термической стабилизацией аустенита за счет повышенной концентрации углерода в напыляемой стали 95X18, а также с особенностями охлаждения газотермического покрытия в процессе напыления. При этом необходимо иметь в виду, что напыление частиц многослойного покрытия происходит на разогретые частицы предыдущих слоев, имеющих температуру 100...200 °С [3]. Такие условия формирования покрытия обеспечивают замедленное его охлаждение в интервале температур повышенной устойчивости аустенита, что способствует стабилизации остаточного аустенита в напыленном слое. В связи с этим покрытие из стали 95X18 имеет сравнительно низкий уровень твердости ~ 300...350 HV 30. Пониженное количество γ -фазы после механической шлифовки (см. табл. 3) связано с деформационно-активированным $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением в поверхностном слое при шлифовании.

Для исследования влияния ионно-лучевого азотирования выбрано покрытие из стали 95X18, содержащее наибольшее количество метастабильного аустенита (см. табл. 3), а именно покрытие, полученное по режиму напыления 2.

В результате ионно-лучевого азотирования покрытия из стали 95X18 при 670...870 К на поверхности формируются модифицированные азотом слои глубиной от 3...5 до 15...20 мкм (рис. 1, табл. 4).

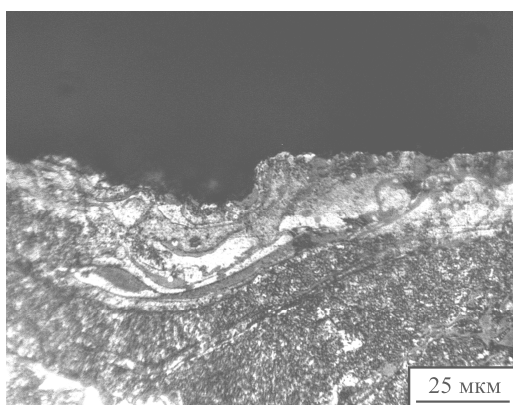


Рисунок 1 – Микроструктура газотермического покрытия из стали 95X18 после ионно-лучевого азотирования при 890 К (2 часа)

После низкотемпературной ионно-лучевой обработки покрытия из стали 95X18 при 670 К в фазовом составе регистрируются γ - и α -фазы, твердый раствор γ'_N -(Fe, Cr) и оксид Fe_3O_4 (табл. 4). Микротвердость модифицированного азотом слоя составляет 900...950 HV 0,025. Повышение дюрометрических характеристик покрытия связано с образованием в его поверхностном слое твердого раствора γ'_N -(Fe, Cr).

Таблица 4 – Характеристики газотермических покрытий из стали 95X18 в исходном состоянии и после ионно-лучевого азотирования

Режим обработки	Глубина слоя, мкм	Фазовый состав	Размер частиц CrN, нм	Микротвердость, HV 0,025	Твердость покрытия под азотированным слоем, HV 30
Исходное состояние	—	γ , α , Fe_3O_4 , FeO	—	440...460	350
Модифицирование азотом при 670 К в течение 2 ч	3...5	γ , α , γ'_N , Fe_3O_4	—	900...950	275
То же при 770 К	7...10	γ , α , γ'_N , CrN, Fe_3O_4	6,0	1100...1200	265
То же при 890 К	15...20	α , γ , CrN, Fe_3O_4	20,0	750...800	260

В фазовый состав покрытия из стали 95X18 после ионного азотирования при 770 К входят γ - и α -фазы, твердый раствор γ'_N -(Fe, Cr), наноразмерные частицы CrN и оксид Fe_3O_4 (см. табл. 4). При этом микротвердость обработанного покрытия составляет 1100...1200 HV 0,025. Существенный прирост микротвердости покрытия обусловлен образованием в поверхностном слое твердого раствора γ'_N -(Fe, Cr), а также выделением дисперсных частиц CrN (см. табл. 4). В результате дальнейшего повышения температуры ионно-лучевого азотирования до 890 К фазовый состав поверхностного слоя покрытия включает в себя: α - и γ -фазы, частицы CrN, оксид Fe_3O_4 (см. табл. 4). При этом в покрытии существенно возрастает содержание α -фазы. Необходимо отметить, что дифракционные линии от α -фазы имеют малую ширину по сравнению со случаем ионного азотирования при 670 и 770 К. Малое физическое уширение дифракционных линий от матричной α -фазы свидетельствует о протекании глубокого распада мартенсита, обра-

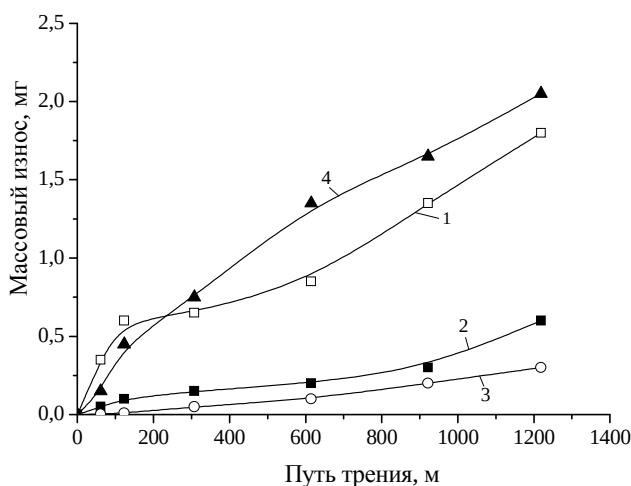
зовавшегося в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в процессе высокотемпературного ионного азотирования. Микротвердость азотированного слоя покрытия после такой обработки составляет 750...800 HV 0,025; твердость подложки – 260 HV 30. Понижение микротвердости поверхностного слоя покрытия связано с отсутствием в фазовом составе твердого раствора γ'_N -(Fe, Cr) и коагуляцией частиц CrN (см. табл. 4). При сопоставлении данных по структурно-фазовому состоянию модифицированных ионами азота слоев в покрытии из стали 95X18 и стали 40X13 [4] можно заключить, что азотированные слои в покрытии из стали 95X18 характеризуются меньшей глубиной. Пониженная глубина азотированного слоя в покрытии из стали 95X18 по сравнению с покрытием из стали 40X13 [4] объясняется высоким содержанием в стали 95X18 углерода, который обладает близким к азоту значением атомного радиуса, размещается в тех же порах кристаллической решетки и таким образом препятствует диффузионному перемещению азота при ионном азотировании. Также из-за аномально высокого содержания аустенита в покрытии из стали 95X18 после ионной обработки азотом при 670...770 К в фазовом составе поверхностных слоев регистрируется твердый раствор γ'_N -(Fe, Cr), характерный для азотированных аустенитных сталей [5].

Для изучения износостойкости и противозадирных свойств газотермических покрытий из стали 95X18 в исходном состоянии и после ионно-лучевого азотирования проводились триботехнические испытания в условиях сухого трения.

Покрытие из стали 95X18 в исходном состоянии характеризуется сравнительно высокой износостойкостью. В частности, интенсивность массового изнашивания $I_q = 1,10 \cdot 10^{-3}$ мг/м (табл. 5, рис. 2). Такая высокая износостойкость покрытия из стали 95X18 достигается за счет деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностном слое при трении. При этом на поверхности трения газотермического покрытия из стали 95X18 образуется тонкий слой с пониженным содержанием аустенита, характеризующийся высокой микротвердостью и износостойкостью, – содержание остаточного аустенита в поверхностном слое покрытия после трения снижается до 22 об. %, а микротвердость возрастает до 800...850 HV 0,025 [3].

Таблица 5 – Интенсивность массового изнашивания газотермических покрытий из стали 95X18 в исходном состоянии и после ионно-лучевой обработки

Режим обработки	Интенсивность массового изнашивания, I_q , 10^{-3} мг/м
Исходное состояние	1,10
Ионно-лучевое азотирование при 670 К (2 ч)	0,48
То же при 770 К	0,24
То же при 890 К	1,46



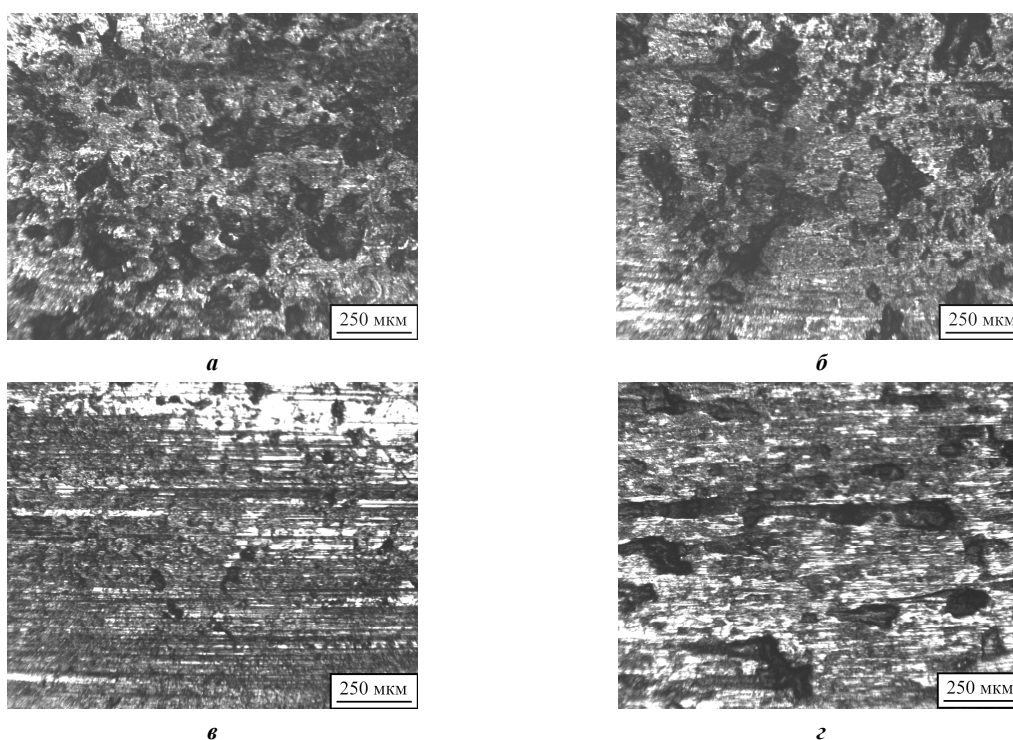
**1 – исходное состояние; 2 – ионно-лучевое азотирование при 670 К;
3 – то же при 770 К; 4 – то же при 890 К**

Рисунок 2 – Зависимость массового изнашивания от пути трения газотермических покрытий из стали 95X18

На поверхности исходного покрытия при трении образуются многочисленные вырывы и присутствуют следы выкрашивания, которые свидетельствуют о протекании процессов адгезионного схватывания между контактирующими телами (рис. 3, а).

В результате ионно-лучевого азотирования при 670 К износостойкость поверхностного слоя газотермического покрытия из стали 95X18 возрастает в 2,3 раза по сравнению с необработанным покрытием, и интенсивность массового изнашивания составляет $0,48 \cdot 10^{-3}$ мг/м (см. табл. 5, рис. 2). Резкое увеличение износостойкости покрытия из высокохромистой стали связано с образованием в процессе ионной обработки в поверхностном слое твердого раствора γ'_N -(Fe, Cr). Увеличение износа на поздних стадиях испытаний (см. рис. 2) связано с изнашиванием модифицированного азотом слоя и выходом поверхности трения в зону неазотированной подложки. На поверхности покрытия из стали 95X18, обработанного ионами азота при 670 К, также регистрируются следы вырывов и выкрашивания (рис. 3, б).

Повышение температуры ионного модифицирования покрытия из стали 95X18 до 770 К приводит к возрастанию его износостойкости в 4,6 раза по сравнению с исходным состоянием (см. табл. 5). При этом интенсивность массового изнашивания обработанного ионами азота покрытия составляет $0,24 \cdot 10^{-3}$ мг/м (см. табл. 5, рис. 2). Увеличение износостойкости покрытия в результате ионной-лучевой обработки при 770 К связано с образованием в поверхностном слое твердого раствора γ'_N -(Fe, Cr) и выделением дисперсных частиц CrN (см. табл. 4). Поверхность трения покрытия, подвергнутого ионно-лучевой обработке при 770 К, гладкая, на ней не выявляется глубоких вырывов и следов выкрашивания (рис. 3, в), что указывает на высокую задиростойкость покрытия. Высокотемпературное ионно-лучевое азотирование при 890 К приводит к снижению износостойкости покрытия и интенсивность массового изнашивания составляет $1,46 \cdot 10^{-3}$ мг/м, что примерно в 1,3 раза выше, чем величина I_q в исходном состоянии (см. табл. 5, рис. 2). Уменьшение износостойкости обработанного ионами азота при 890 К покрытия из стали 95X18 обусловлено отсутствием в поверхностном слое твердого раствора γ'_N -(Fe, Cr) и коагуляцией частиц CrN (см. табл. 4), а также с термически активированным фазовым $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением и отжигом подложки в процессе высокотемпературного ионного азотирования (см. табл. 4). На микроснимке поверхности трения имплантированного при 890 К покрытия регистрируются вырывы и пластическое течение поверхностных слоев (рис. 3, г), что связано с выходом поверхности трения в зону разупрочненной подложки.



а – исходное состояние; *б* – ионно-лучевое азотирование при 670 К;
в – то же при 770 К; *г* – то же при 890 К

Рисунок 3 – Поверхности трения газотермических покрытий из стали 95X18 ($L = 1200$ м; $P = 1,5$ МПа)

Таким образом, данные триботехнических испытаний показывают, что ионно-лучевое азотирование при температуре 770 К приводит к значительному повышению износостойкости и задиростойкости покрытий из высокохромистой стали 95X18.

Закключение. Исследовано структурно-фазовое состояние и дюрометрические характеристики газотермических покрытий из стали 95X18, полученных по различным режимам напыления. Установлено, что содержание остаточного аустенита в покрытиях из стали 95X18, сформированных по различ-

ным режимам напыления, находится в пределах от 54 до 71 об. %, а твердость этих покрытий составляет 300...350 HV 30. Высокая износостойкость газотермического покрытия из стали 95X18 достигается вследствие деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в поверхностных слоях при трении.

Изучено влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние, дюрOMETрические и триботехнические характеристики газотермических покрытий из стали 95X18. Показано, что ионно-лучевая обработка покрытия приводит к формированию модифицированных азотом слоев толщиной от 3...5 до 15...20 мкм, содержащих твердый раствор γ'_N -(Fe, Cr) и частицы CrN. Сделан вывод, что пониженная глубина азотированных слоев связана с высоким содержанием углерода в покрытии, который препятствует диффузионному перемещению азота в процессе ионно-лучевого азотирования. Установлено, что из-за аномально высокого содержания аустенита в покрытии из стали 95X18 в фазовом составе азотированных слоев в результате обработки при 670...770 К регистрируется преимущественно твердый раствор γ'_N , характерный для фазового состава азотированных аустенитных сталей. После обработки ионами азота при температурах 670...890 К микротвердость покрытия из стали 95X18 возрастает в 1,7...2,5 раза, а износостойкость в 2,3...4,6 раза по сравнению с исходным состоянием. Наиболее высокие дюрOMETрические и триботехнические характеристики достигаются в результате ионной имплантации при 770 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. наука, 1998. – 583 с.
2. Белый, А.В. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А.В. Белый, В.А. Кукареко, А. Патеюк. – Минск: Беларус. наука, 2007. – 244 с.
3. Григорчик, А.Н. Деформационно-активированное мартенситное превращение в газотермических покрытиях из высокохромистых сталей при сухом трении / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский. – Гомель: ИММС НАНБ // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «ПОЛИКОМТРИБ-2015», 2015. – С. 75.
4. Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства обработанного ионами азота газотермического покрытия из стали 40X13 / А.Н. Григорчик [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 2. – С. 26–30.
5. Структура и триботехнические характеристики газотермического покрытия из проволоочной стали 06X19H9T обработанного ионами азота / А.Н. Григорчик [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 2. – С. 61–64.

Поступила 20.01.2016

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF SPUTTERING AND ION NITRIDING ON MICROSTRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF GAS-THERMAL COATING OF HIGH CHROMIUM STEEL 95X18

A. GRIGORCHIK, V. KUKAREKO, M. BELOTSEKOVSKY, A. BELY

The influence of the parameters of the deposition and ion-beam nitriding on the structural-phase state, microhardness and tribological properties of gas-thermal coating development of high chromium steel 95X18 have been investigated. It is shown that as a result of ionic treatment for at 670...890 K on the surface of the coating formed modified nitrogen layers depth from 3...5 up to 15...20 microns. Ion treatment results in the formation on the surface coating of a solid solution γ'_N -(Fe, Cr) and the allocation of CrN particles. In the process of tribological tests under dry friction in the surface layers of gas-thermal coating is the deformation-activated $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation, leading to a significant increase in the wear resistance and microhardness of the coating. It is shown that as a result of ion-beam nitriding microhardness of coatings from steel 95X18 increases in 1,7...2,5 times, and the wear resistance in 2,3...4,6 times compared to untreated coating.

Keywords: gas-thermal coating, metastable austenite, ion-beam nitriding, dry friction, deformation-activated transformation.

УДК 669.248

РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА НИКЕЛИРОВАННОГО ПОРОШКООБРАЗНОГО ПЕРЛИТА

О.В. БОЙПРАВ; д-р техн. наук, проф. Т.В. БОРБОТЬКО; д-р техн. наук, проф. Л.М. ЛЫНЬКОВ
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Представлены результаты исследования влияния химического осаждения никеля на поверхность порошкообразного перлита на значения его коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 8...12 ГГц. Показано, что наибольшее снижение величин указанных параметров для порошкообразного перлита обеспечивается в случае, когда его никелирование выполняется с помощью водных растворов, в которых в качестве восстановителя используется сульфат никеля. Предложено применять никелированный порошкообразный перлит для создания радиопоглощающих материалов и покрытий.

Ключевые слова: коэффициенты отражения и передачи, никелирование, перлит, химическое осаждение, электромагнитное излучение.

Введение. Ослабление энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) может быть обеспечено путем экранирования его источников. Для этой цели используются конструкции электромагнитных экранов, радиопоглощающие свойства которых взаимосвязаны с величинами их коэффициентов отражения и передачи ЭМИ. Указанные параметры, в свою очередь, зависят от состава материалов, применяемых для формирования таких конструкций. Поэтому на практике получение требуемых значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ конструкций электромагнитных экранов достигается за счет модификации материалов путем введения в них компонентов, свойства которых (относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости, проводимость, вязкость и т.п.) обуславливают потери энергии излучения, взаимодействующего с ними. В качестве таких компонентов могут использоваться жидкие среды или металлы, вводимые в виде кластеров в поры модифицируемого материала или закрепляемые на его поверхности [1; 2]. Металлизация материалов, в процессе которой на их поверхности или в объеме формируются металлические кластеры, влияет в меньшей степени на увеличение массы исходного материала. Кроме того, такой метод позволяет обеспечить стабильность коэффициентов отражения и передачи ЭМИ синтезируемого материала при условии соответствующего показателя адгезии вводимых металлических частиц. В работе [3] доказано, что названный показатель в наибольшей степени обеспечивается для частиц никеля по сравнению с частицами на основе других металлов или их сплавов. Процесс покрытия (обработки) поверхности материалов слоем на основе частиц никеля с размером 1...50 мкм называют никелированием. Оно может выполняться гальванотехническим или химическим способом. Суть первого способа заключается в выдерживании обрабатываемого материала в химической ванне, в которой находятся электролит и никелевые электроды. Основные недостатки способа – значительные временные и энергетические затраты, связанные с необходимостью поддержания постоянной разности потенциалов между электродами, а также неравномерность наносимого покрытия (кластеры никеля могут формироваться в порах материалов определенного размера). Указанные недостатки не характерны для второго способа, суть которого заключается в восстановлении (химического осаждения) из водных растворов никеля на поверхности обрабатываемого материала [3].

Цель работы заключалась в исследовании влияния химического осаждения никеля из водных растворов на поверхность порошкообразного перлита на значения его коэффициентов отражения и передачи ЭМИ.

Методики никелирования порошкообразного перлита. В качестве объекта никелирования был выбран промышленно выпускаемый порошкообразный перлит с размером фракций $0,5 \pm 0,2$ мм, что обусловлено высоким значением его пористости по сравнению с порошкообразным перлитом иных типов [4]. Никелирование порошкообразного перлита выполнялось поэтапно по двум методикам.

Методика № 1:

- 1) приготовление водного раствора на основе сульфата никеля (кристаллогидрат) (30 г/л) и хлористого аммония (30 г/л);
- 2) нагрев приготовленного водного раствора до температуры 85 °С. Контроль температуры раствора выполнялся с помощью термометра лабораторного химического (по ТУ 25-2021.003-88) [5];
- 3) введение в приготовленный водный раствор порошкообразного перлита (соотношение объемов 4 : 1 соответственно);
- 4) добавление в водный раствор восстановителя (гипофосфит натрия (10 г/л));
- 5) выдерживание порошкообразного перлита в приготовленном водном растворе;
- 6) извлечение порошкообразного перлита из водного раствора;
- 7) промывка дистиллированной водой порошкообразного перлита, извлеченного из водного раствора;

8) стабилизация кластеров никеля на поверхности порошкообразного перлита с использованием трет-бутилового спирта;

9) промывка дистиллированной водой порошкообразного перлита;

10) сушка порошкообразного перлита при стандартных условиях [3; 6].

Методика № 2:

1) приготовление водного раствора на основе хлорида никеля (кристаллогидрат) (30 г/л) и лимоннокислого натрия (10 г/л);

этапы 2 и 3 аналогичны соответствующим этапам методики № 1;

4) добавление в водный раствор восстановителя (гипофосфит натрия (10 г/л));

этапы 5–10 аналогичны соответствующим этапам методики № 1 [7].

При восстановлении никеля в щелочном растворе хлорида или сульфата никеля при наличии восстановителя (гипофосфита натрия) протекают следующие реакции:

- восстановление: $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}^0 \downarrow$;

- окисление: $\text{PO}_2^{3-} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{PO}_3^{3-} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$.

Общее уравнение реакции: $\text{Ni}^{2+} + \text{PO}_2^{3-} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ni}^0 \downarrow + \text{PO}_3^{3-} + 2\text{H}^+$ [8].

Оборудование и методика измерения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов.

Исследуемые образцы формировались путем заполнения порошкообразным перлитом емкостей, изготовленных из полимерного радиопрозрачного материала. Для изготовления образца № 1 использовался порошкообразный перлит; для образцов № 2 и 3 – порошкообразный перлит, никелированный согласно методике № 1 и № 2 соответственно.

Толщина образцов составляла $3 \pm 0,005$ мм, измерение которой выполнялось с помощью микрометра типа МК класса точности 1 (по ГОСТ 6507-90) [9].

Для проведения измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц исследуемых образцов использовалась измерительная система, включающая в себя:

- генератор качающейся частоты (ГКЧ) 61;

- волноводы;

- направленные ответвители падающих ($\text{НО}_{\text{пад}}$) и отраженных ($\text{НО}_{\text{отр}}$) электромагнитных волн (ЭМВ);

- индикатор Я2Р-67.

Генератор качающейся частоты является источником ЭМИ диапазона 8...12 ГГц.

Ответвители $\text{НО}_{\text{пад}}$ и $\text{НО}_{\text{отр}}$ предназначены для выделения падающих и отраженных ЭМВ соответственно, индикатор Я2Р-67 – для детектирования и отображения значений амплитуды таких волн.

Значение коэффициента отражения ЭМИ (S_{11}) исследуемых образцов определялось отношением амплитуды ЭМВ, отраженной от согласованной нагрузки и выделенной $\text{НО}_{\text{от}}$, и амплитуды падающей ЭМВ, выделенной $\text{НО}_{\text{пад}}$ [10]:

$$S_{11} = \frac{A_{\text{НО}_{\text{от}}}}{A_{\text{НО}_{\text{пад}}}},$$

где $A_{\text{НО}_{\text{от}}}$ – амплитуда ЭМВ, отраженной от согласованной нагрузки и выделенной $\text{НО}_{\text{от}}$; $A_{\text{НО}_{\text{пад}}}$ – амплитуда падающей ЭМВ, выделенной $\text{НО}_{\text{пад}}$.

При проведении измерений значений коэффициента отражения ЭМИ образцы располагались между фланцем волновода и согласованной нагрузкой.

Коэффициент передачи ЭМИ (S_{21}) исследуемых образцов определялся отношением амплитуды ЭМВ, прошедшей через образец и зарегистрированной индикатором Я2Р-67, и амплитуды ЭМВ, выделенной $\text{НО}_{\text{пад}}$ [10]:

$$S_{21} = \frac{A_{\text{прош}}}{A_{\text{НО}_{\text{пад}}}},$$

где $A_{\text{прош}}$ – амплитуда ЭМВ, прошедшей через исследуемый образец и зарегистрированной индикатором Я2Р-67; $A_{\text{НО}_{\text{пад}}}$ – амплитуда падающей ЭМВ, выделенной $\text{НО}_{\text{пад}}$.

При проведении измерений значений коэффициента передачи ЭМИ образец располагался между фланцами волноводов.

Результаты рентгенофазового анализа порошкообразного перлита. Рентгенодифракционные исследования порошкообразного перлита выполнялись на автоматизированном дифрактометре ДРОН-3 в монохроматизированном CuK_{α} -излучении (длина волны $\lambda = 1,5417737$ Å) согласно методике, представлен-

ной в [11]. Идентификация максимумов полученных дифрактограмм реализовывалась с применением программного обеспечения «Crystal Impact MATCH! v. 1.11». Дифрактограммы порошкообразного перлита показаны на рисунках 1–3.

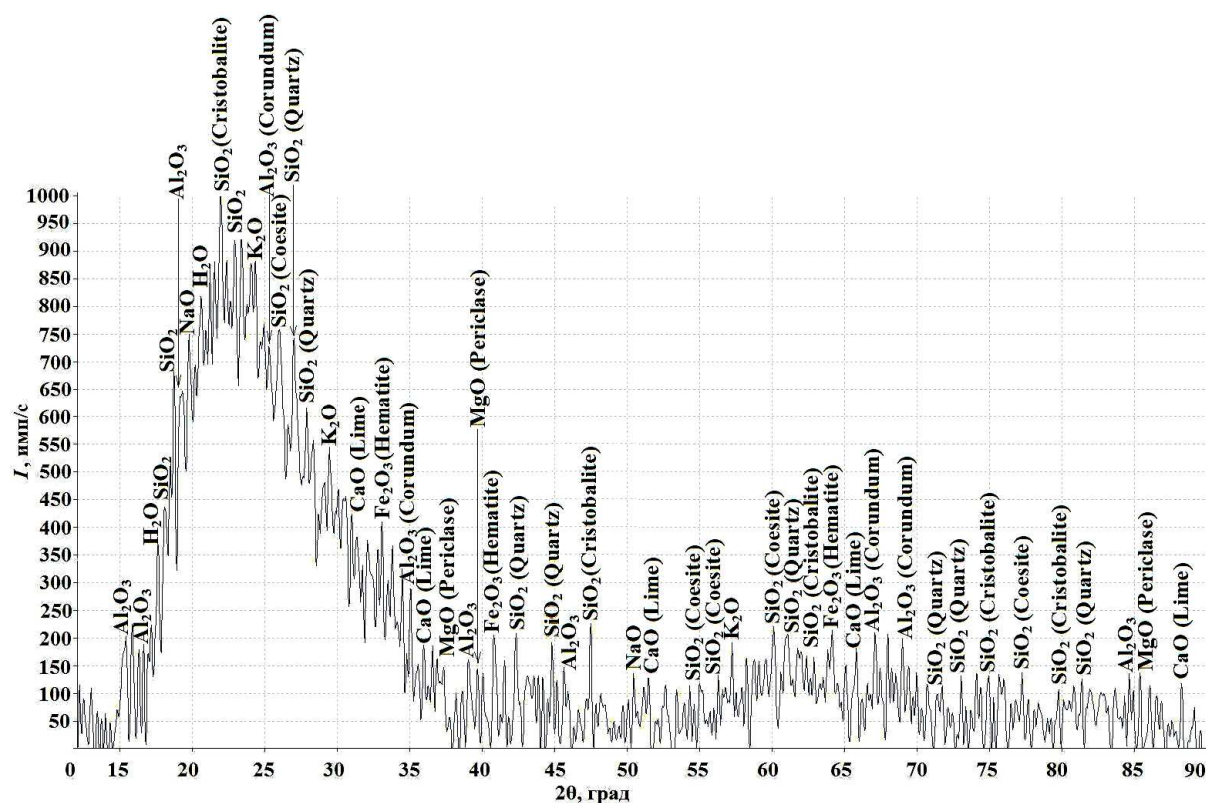


Рисунок 1 – Дифрактограмма порошкообразного перлита

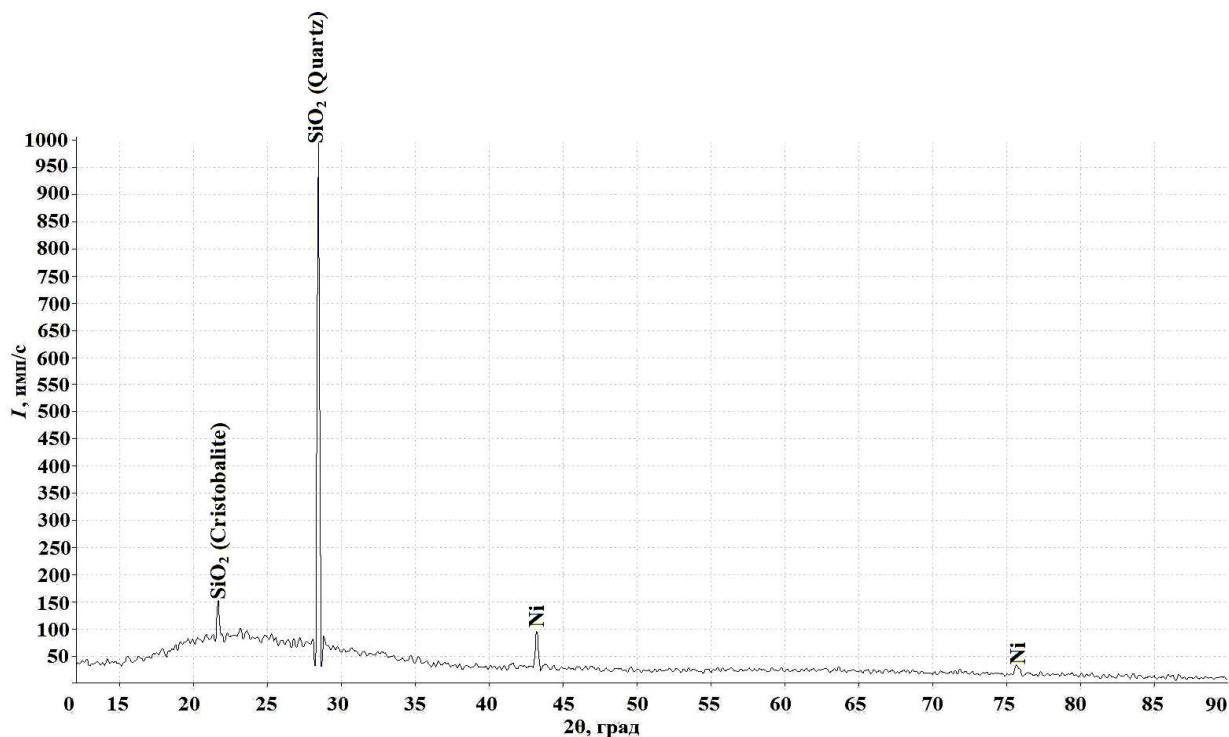


Рисунок 2 – Дифрактограмма порошкообразного перлита, никелированного по методике № 1

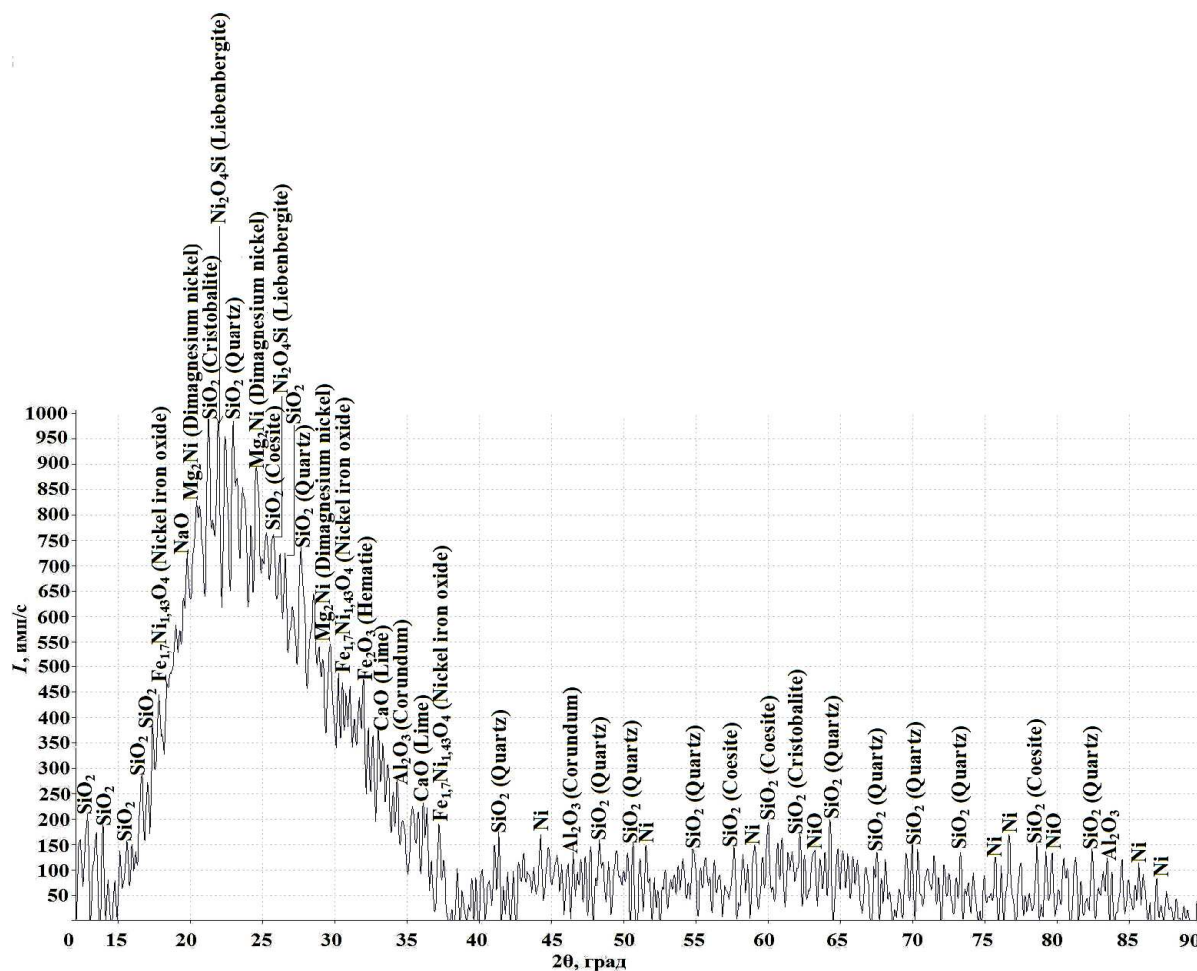


Рисунок 3 – Дифрактограмма порошкообразного перлита, никелированного по методике № 2

На основе результатов анализа дифрактограммы порошкообразного перлита установлено, что наибольшей интенсивностью (I) характеризуются дифракционные максимумы, соответствующие модификациям оксида кремния (SiO_2) – кристобалит, кварц, коэсит, а также оксида алюминия (Al_2O_3). Это позволяет сделать вывод о том, что указанные вещества являются основными компонентами порошкообразного перлита. Кроме того, в состав такого материала входят оксиды трехвалентного железа, калия, кальция, магния, а также связанная (дегидратированная) вода (Fe_2O_3 , K_2O , CaO , MgO и H_2O соответственно).

На дифрактограмме порошкообразного перлита, никелированного по методике № 1, идентифицированы дифракционные максимумы, соответствующие фазам никеля (Ni). Значения углов 2θ для них равны 44 и 76°. Наибольшей интенсивностью характеризуются дифракционные максимумы, соответствующие фазам оксида кремния (значения углов 2θ равны 23 и 27°). На дифрактограмме порошкообразного перлита, никелированного по методике № 2, наибольшей интенсивностью характеризуются максимумы, соответствующие фазам оксида кремния (значения углов 2θ составили 21, 23 и 27°), силиката никеля ($2\theta = 22^\circ$), а также димагниевого никеля (Mg_2Ni) (значения углов 2θ равны 20 и 25°). Также идентифицированы фазы, соответствующие оксиду никеля и железа ($\text{Fe}_{1.7}\text{Ni}_{1.43}\text{O}_4$), а также силикат никеля (либенбергит, $\text{Ni}_2\text{O}_4\text{Si}$). Полученные результаты обуславливают тот факт, что в результате никелирования перлита в его порах формируются кластеры никеля либо соединения никеля с другими компонентами такого порошкообразного материала.

Результаты измерения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ порошкообразного перлита. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ исследованных образцов представлены на рисунках 4–6. Установлено, что образец, выполненный из порошкообразного перлита, характеризуется значениями коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц, составляющих соответственно –10...–11 дБ и –4,5...–6,5 дБ. Ослабление ЭМИ таким материалом обусловлено наличием в его составе связанной воды и оксида трехвалентного железа (гематита), обеспечивающих потери на проводимость и магнитные потери энергии излучения. Закрепление такого образца на металлической подложке приводит к снижению до –10...–12 дБ значений его коэффициента отражения ЭМИ

в диапазоне частот 8...10 ГГц и увеличению до $-7,5...-10$ дБ значений указанного параметра в диапазоне частот 10...12 ГГц. Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ рассматриваемого образца толщиной 3 мм характеризуется наличием точки минимума, значение которой равно $9 \pm 0,25$ ГГц. Это может быть обусловлено явлением интерференции электромагнитных волн, отражаемых от поверхностей образца и металлической подложки, на которой он закреплен. В результате этого явления происходит уменьшение амплитуды отраженной волны.

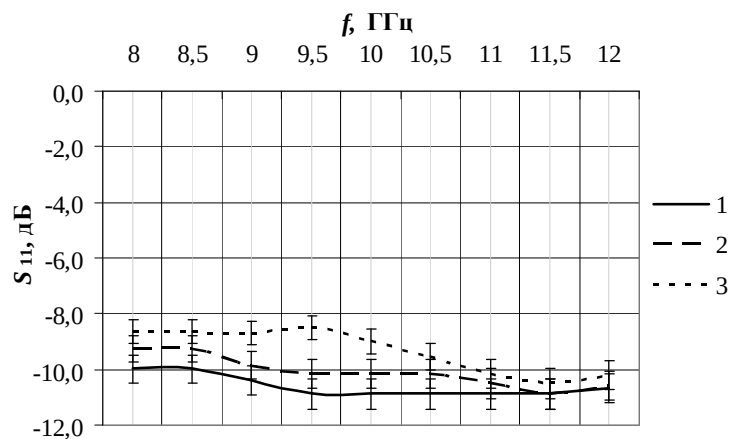


Рисунок 4 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц образцов № 1 (кривая 1), № 2 (кривая 2) и № 3 (кривая 3)

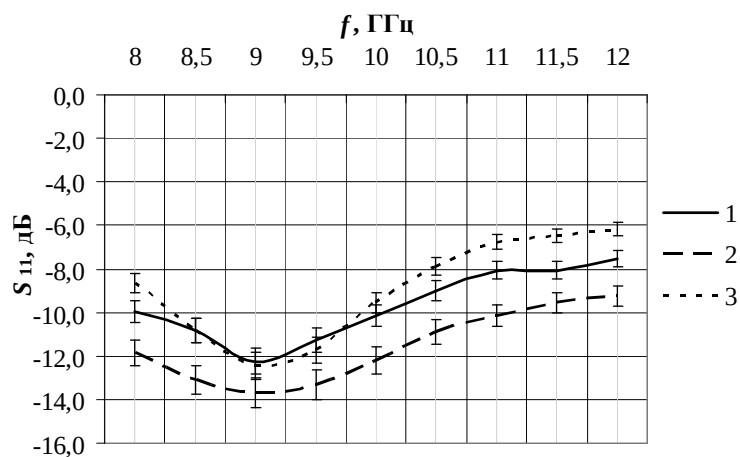


Рисунок 5 – Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц, закрепленных на металлической подложке образцов № 1 (кривая 1), № 2 (кривая 2) и № 3 (кривая 3)

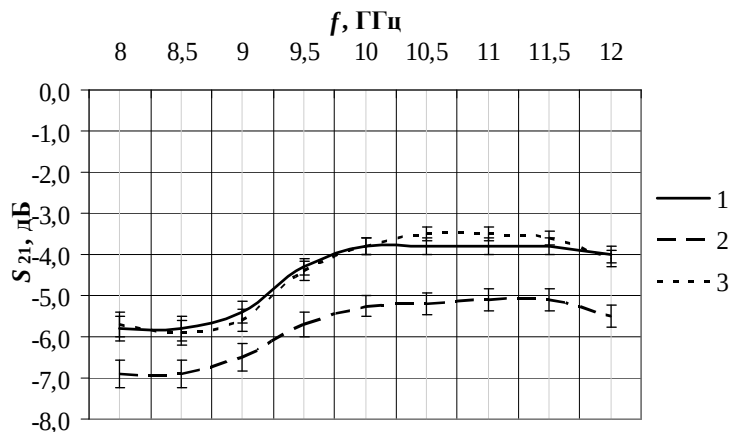


Рисунок 6 – Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц образцов № 1 (кривая 1), № 2 (кривая 2) и № 3 (кривая 3)

При никелировании порошкообразного перлита по методике № 1 установлено, что значения его коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц увеличиваются с $-10...-11$ до $-9...-11$ дБ (при закреплении на металлической подложке – с $-10...-12$ до $-8,5...-10,5$ дБ); значения коэффициента передачи ЭМИ в указанном диапазоне частот при этом уменьшаются с $-4,5...-6,5$ до $-6...-8$ дБ.

Такие явления обусловлены тем, что в результате никелирования перлита согласно методике № 1 в его порах формируются кластеры никеля, характеризующегося ферромагнитными свойствами и в связи с этим обеспечивающего потери энергии ЭМИ, взаимодействующего с таким порошкообразным материалом.

Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц образца на основе порошкообразного перлита, никелированного по методике № 2, превышают на 5...15% величины указанного параметра для образца на основе порошкообразного перлита, никелированного согласно методике № 1.

Значения коэффициента передачи ЭМИ образца № 3 по сравнению с образцом № 2 ниже на 15...20 %. Это обусловлено тем, что в результате никелирования порошкообразного перлита согласно методике № 2 в его порах формируются не только кластеры никеля, но и димагний никель, оксид никеля и железа, а также силикат никеля. Названные материалы характеризуются ферромагнитными свойствами [12; 13].

Показано, что частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 8...12 ГГц закрепленных на металлической подложке образцов на основе никелированного порошкообразного перлита характеризуются наличием точки минимума, значение которой составляет $9\pm 0,25$ ГГц. Минимум при этом равен -14 дБ (для образца № 2) и -12 дБ (для образца № 3).

Таким образом, никелирование порошкообразного перлита не оказывает влияния на значение точки минимума частотной зависимости коэффициента отражения ЭМИ закрепленного на металлической подложке образца на его основе (см. рис. 5). При этом значение минимума снижается на 20% (при использовании для никелирования методики № 1) или остается неизменным (при использовании для никелирования методики № 2).

Заключение. Установлено, что никелирование порошкообразного перлита с помощью водных растворов, в которых в качестве восстановителя используется сульфат никеля (кристаллогидрат), приводит к снижению с $-7,5...-12,5$ до $-9,5...-14$ дБ значений коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц такого материала (при использовании металлического отражателя).

Показано, что никелирование порошкообразного перлита не приводит к изменению значения точки минимума частотной зависимости коэффициента отражения ЭМИ материала в диапазоне частот 8...12 ГГц (при использовании металлического отражателя), которое составляет $9\pm 0,25$ дБ. В результате реализации этого процесса изменяется только значение минимума указанной зависимости (уменьшается с -12 до -14 дБ).

Полученные результаты позволяют рекомендовать применение никелированного порошкообразного перлита для формирования радиопоглощающих покрытий, характеризующихся значениями коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 8...12 ГГц, составляющими $-9,5...-14$ дБ. Введение такого материала в полимерные матрицы позволит получать конструкции электромагнитных экранов, минимальные значения коэффициента отражения ЭМИ которых и частота, соответствующая такому значению, будут зависеть от используемого полимерного материала и типа металлических кластеров, формируемых на поверхности порошкообразного перлита. По сравнению с иными порошкообразными материалами, характеризующимися схожими величинами коэффициента отражения ЭМИ и применяемыми в аналогичных целях (шунгит, диоксид титана, силикагель и т.п.), порошкообразный перлит отличается пониженной массой на единицу объема (до 150 кг/м^3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Альябад, Хуссейн Мохамед. Водосодержащие вспененные комбинированные конструкции интегральных панелей для систем защиты информации от утечки по электромагнитным, оптическим и акустическим каналам / Альябад Хуссейн Мохаммед: автореф. дис. ... канд. техн. наук; Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2010. – 22 с.
2. Фан Ньят Занг. Формирование водосодержащих силикагелевых и бентонитовых материалов для высокостабильных экранов электромагнитного излучения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Фан Ньят Занг; Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2007. – 22 с.
3. Вансовская, К.М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом / К.М. Вансовская; под ред. П.М. Вечяславова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 103 с.

4. Адрианов, Р.А. Пенопласты на основе фенолформальдегидных полимеров / Р.А. Адрианов, Ю.Е. Пономарев. – Ростов н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 1987. – 80 с.
5. Термометры ртутные стеклянные лабораторные: ТУ 25-2021.003-88.
6. McNaught, A.D. Standard conditions for gases. IUPAC. Compendium of Chemical Terminology / A.D. McNaught, A. Wilkinson. – Oxford, 1997.
7. Мелашенко, Н.Ф. Гальванические покрытия диэлектриков: справ. / Н.Ф. Мелашенко. – Минск: Беларусь, 1987. – 176 с.
8. Криштопова, Е.А. Углеродсодержащие порошкообразные материалы на основе шунгита и таурита для экранов электромагнитного излучения: дис. ... канд. техн. наук / Е.А. Криштопова; Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2009. – 20 с.
9. Микрометры. Технические условия: ГОСТ 6507-90. – М.: Изд-во стандартов, 2004.
10. Зайцев, А.Н. Измерения на сверхвысоких частотах и их метрологическое обеспечение / А.Н. Зайцев, П.А. Иващенко, А.В. Мыльников. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 240 с.
11. Вольдсет, Р. Прикладная спектрометрия рентгеновского излучения / Р. Вольдсет. – М.: Атомиздат, 1977. – 192 с.
12. NiO nanocomposite powder obtained from acetylacetonato complexes / M Vučinić-Vasić [et. al.] // Nanotechnology. – 2006. – Vol. 17, Number 19.
13. Buschow, K.H.J. Magnetic properties of MgCo_2 , MgNi_2 and Mg_2Ni / K.H.J. Buschow // Solid State Communications. – 1975. – Vol. 17, Issue 7. – P. 891–893.

Поступила 01.02.2016

RADIOABSORBING PROPERTIES OF NICKELED POWDERED PERLITE

O. BOIPRAV, T. BORBOTKO, L. LYNKOU

The researching results of influence of nickel's chemical deposition on the powdered perlite surface on it's electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values in the frequency range 8...12 GHz are presented. It is shown that the greatest reduction of specified parameters for powdered perlite is provided in a case where nickel sulfate is used as reductant in water solutions utilized for it's nickelage. It is proposed to use the nickeled powdered perlite to create a radioabsorbing covers and materials.

Keywords: reflection and transmission coefficients, nickelage, perlite, chemical deposition, electromagnetic radiation.

УДК 66.017

К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ТВЕРДОСТИ ПОЛУТЕПЛОСТОЙКОЙ СТАЛИ X12M МЕТОДАМИ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

канд. техн. наук, доц. **И.Н. СТЕПАНКИН; Е.П. ПОЗДНЯКОВ; Е.А. АСТАПОВ**
(Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого)

Демонстрируются результаты исследования структуры, фазового состава и свойств инструментальной стали X12M во взаимосвязи с режимами термической и химико-термической обработок. Показано влияние криогенной обработки и низкотемпературной нитроцементации на структурообразование сплава, закаленного с различных температур. Осуществлена расчетная оценка предела контактной выносливости с учетом распределения микротвердости по сечению упрочненного слоя. Даны рекомендации по выбору режимов термохимической обработки, обеспечивающих получение наиболее высоких прогнозных показателей износоустойчивости при контактных напряжениях выше 1000 МПа.

Ключевые слова: сталь X12M, штамповая оснастка, твердость, низкотемпературная нитроцементация, предел контактной выносливости.

Введение. Твердость инструментальной стали, применяемой для изготовления деформирующего инструмента, является основным параметром, определяющим износоустойчивость материала. Ресурс штампов, применяемых при массовом производстве метизов высадкой и чеканкой, как правило, ограничивается способностью поверхностного слоя металла противостоять зарождению и распространению трещин контактной усталости. При этом взаимодействие поверхности инструмента с металлом заготовки происходит с незначительным скольжением на поверхности раздела или вообще без него. В такой ситуации прогнозирование наработки штампов на отказ вполне закономерно проводить на основе оценки предела контактной выносливости материала. Его можно рассчитать по стандартным зависимостям, учитывающим твердость поверхностного слоя материала:

$$\sigma_{\text{Hlim}} = 23\text{HRC}_\Sigma [1], \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{Hlim}} = 1,25\text{HV} [2]. \quad (2)$$

Широко применяемая для изготовления холоднотвердеющих штампов сталь X12M отличается достаточно высокой износоустойчивостью. Основными структурными составляющими сплава являются легированные карбиды, мартенсит, а также некоторое количество остаточного аустенита. Повышение количества γ -фазы, с одной стороны, сопровождается снижением твердости материала [3]. С другой – динамическое старение аустенита в процессе эксплуатации инструмента способствует увеличению наработки на отказ за счет повышения вязкости сплава [4]. Режимы формирования заданных свойств рассматриваемой стали могут способствовать получению достаточно высоких значений твердости (60...63 HRC) в сочетании с некоторым количеством остаточного аустенита или его превращению в мартенсит при отпуске свыше 400 °С, обеспечивающем получение вторичной твердости в диапазоне 52...59 HRC [5; 6]. Очевидно, что подобное снижение твердости в соответствии с зависимостями (1) и (2) будет негативно сказываться на величине предела контактной выносливости металла. Для его повышения в совокупности с режимами термообработки, направленными на максимальное превращение аустенита, возможно применение поверхностного модифицирования, проводимого при температурах не более 560 °С.

Методика и объекты исследований. Для исследований применяли образцы из стали X12M, предварительная термическая обработка которых проводилась по режимам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы термической обработки образцов из стали X12M

Режим термической обработки		Номер партии образцов			
		1	2	3	4
Закалка	первый подогрев, °С	425			
	второй подогрев, °С	825			
	окончательный нагрев, °С	1170	1140	1040	1040
	охлаждающая среда	воздух		масло	
	криогенная обработка	–196		–196	–
Отпуск, °С		550 (3 раза)		200	200
Твердость, HRC		58...60	60...61	65...66	63...64

После термической обработки с поверхности образцов удаляли окисленный слой и обезжиривали. Нитроцементацию осуществляли в твердом карбюризаторе на основе древесного угля, модифицированного мочевиной, при температуре 520 °С. Выбор в пользу указанного состава сделан вследствие того, что при данной температуре поверхностный слой насыщается преимущественно атомарным азотом [7]. Это позволяет использовать простую и достаточно эффективную технологию для формирования в поверхностном слое карбонитридных соединений. Общая длительность химико-термической обработки составляла 17 часов. В качестве оснастки использовали контейнер из жаропрочной стали 09X18H10T диаметром 70, высотой 100 и толщиной стенок 2 мм. В первом приближении считали, что длительность времени для сквозного прогрева контейнера и его содержимого до температуры насыщения составляла незначительный период по сравнению с общей продолжительностью всего процесса ХТО. Герметичность внутреннего содержимого контейнера обеспечивали путем заделки затвора между стаканом и крышкой контейнера смесью натриевого жидкого стекла и кварцевого песка.

ДюрOMETрические испытания проводили на приборах Роквелла и ПМТ-3. Исследование микроструктуры осуществляли на оптическом микроскопе Метам РВ-22. Для оценки фазового состава использовали дифрактограммы, полученные на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 с применением рентгеновской трубки 2,0БСВ27-Со при напряжении 40 кВ и силе тока 30 мА.

Результаты исследований и их обсуждение. Известно, что легирование хромом инструментальных штамповых сталей не приводит к возрастанию их хрупкости. Эта закономерность выявлена для сплавов, содержащих до 15% хрома [5]. С повышением содержания данного легирующего элемента возрастает доля остаточного аустенита, который оказывает существенное влияние на вязкость полутеплостойких штамповых сталей. Механизм разрушения штампового инструмента во многом определяется уровнем контактных нагрузок, возникающих на гравюре штампа. Наличие некоторого количества остаточного аустенита в структуре сплава может существенно повысить стойкость оснастки. При этом следует учитывать, что чрезмерное повышение уровня остаточного аустенита приводит к снижению твердости металла, что, в свою очередь, снижает контактную выносливость инструмента [8].

Являясь метастабильной фазой, остаточный аустенит, присутствующий в сплаве, способен к динамическому старению. В частности, воздействие внешней нагрузки на сталь Х12М, закаленную с температуры 1080 °С и подвергнутую низкотемпературному отпуску, сопровождается упрочнением сплава. Этот эффект наблюдается при величине деформации до 0,2%. Более высокие значения приводят к разрушению металла [9].

Таким образом, выбор соотношения между объемами мартенсита и остаточного аустенита в металлической матрице полутеплостойких штамповых сталей с содержанием хрома 12% является важной материаловедческой задачей, позволяющей адаптировать структуру сплава к условиям работы штампового инструмента. Этот критерий наряду с твердостью следует учитывать при разработке технологии упрочнения штампового инструмента из стали Х12М и ее аналогов.

Для оценки влияния режимов термической обработки стали Х12М на ее фазовый состав проведены рентгеноструктурные исследования образцов. Как видно из таблицы 1, в результате повышения температуры закалки в совокупности с криогенной обработкой и применением дисперсионного твердения твердость сплава составила не менее 58HRC. Это минимальное значение, рекомендуемое при изготовлении штампового инструмента для холодного объемного деформирования заготовок [10]. Основным результатом термической обработки указанных партий образцов является достижение минимального содержания остаточного аустенита [3].

Образцы третьей и четвертой партий, закаленные с температуры 1040 °С, имели твердость не более 66 HRC. Применение криогенной обработки привело к незначительному увеличению этого параметра в пределах погрешности эксперимента. Ожидаемое различие твердости между третьей и четвертой партиями образцов обусловлено различным содержанием аустенита (около 20% (четвертая партия) и до 10% (третья партия) [3]) оказалось несущественным.

Результаты рентгеноструктурного анализа, проведенного на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7, показали, что обработка образцов в жидком азоте после закалки и последующего отпуска при 200 °С приводит к смещению главного пика α -фазы на дифрактограмме с угла $2\theta = 52,2853$ до $2\theta = 52,2978^\circ$. При этом изменяется полуширина пика с 0,2896 до 0,4900°, что говорит об уменьшении размеров кристаллических образований в структуре стали при обработке холодом в результате мартенситных превращений части остаточного аустенита, содержащегося в сплаве перед началом криогенной обработки. В структуре стали наблюдается преимущественно твердый раствор, представляющий собой легированный мартенсит и карбиды типа M_7C_3 (рис. 1 и 2). О присутствии остаточного аустенита можно судить о формировании так называемого «большеуглового хвоста» [11], у основания пика α -фазы отражаемым линиями 51,6428 и 51,4393° соответственно.

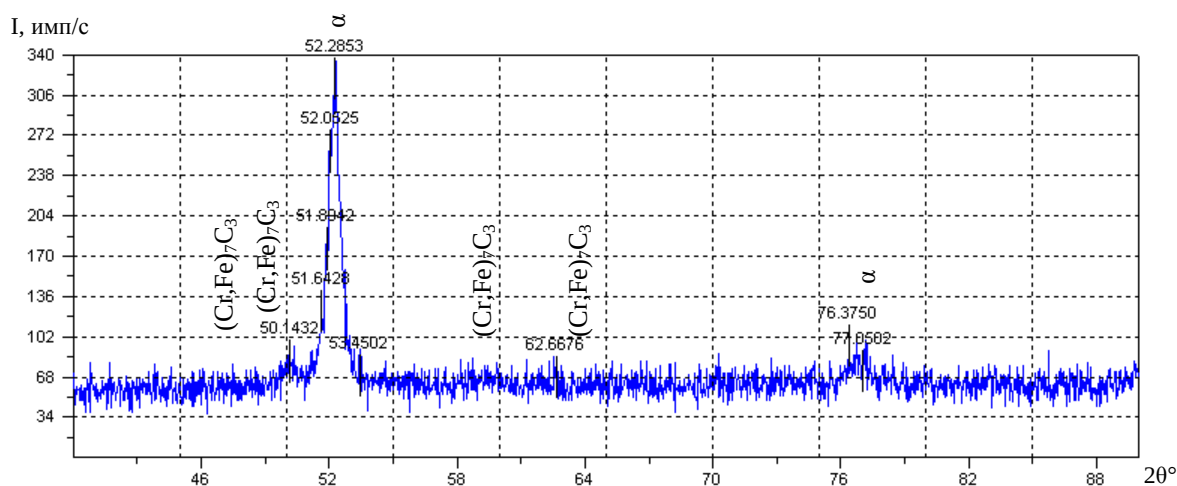


Рисунок 1 – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK_α) стали X12M, подвергнутой закалке 1040 °C и отпуску 200 °C

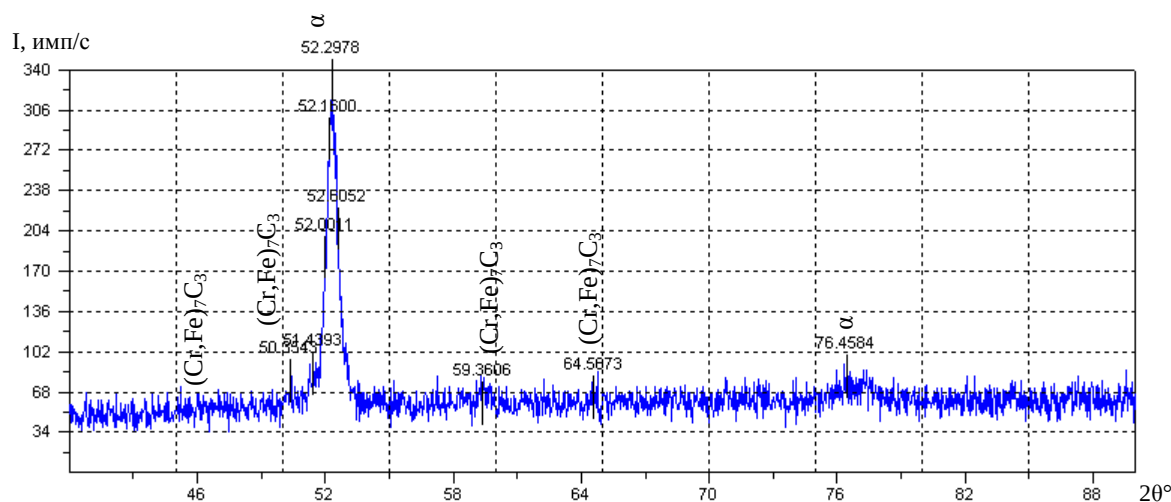


Рисунок 2 – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK_α) стали X12M, подвергнутой закалке с 1040 °C с криогенной обработкой и отпуску 200 °C

Увеличение температуры закалки до 1140 и 1170 °C и проведение отпуска при температуре 550 °C после криогенной обработки приводит к дальнейшему увеличению полуширины пика α -фазы соответственно до 0,5171 и 0,7685° (рис. 3 и 4), что свидетельствует о более значительном измельчении кристаллических образований, чем у двух других партий образцов. Уменьшение параметров решетки α -фазы, ее тетрагональности может быть связано с выделением из мартенсита некоторого количества легирующих элементов и образования мелкодисперсных карбидов типа Me_7C_3 и Me_2C при температуре отпуска выше 550 °C. Мартенситные превращения в области низких температур (ниже 0 °C) происходят с образованием двойникового мартенсита [3]. В результате отпуска при температуре выше 550 °C происходит снижение степени легированности мартенсита и снижение количества углерода в нем. Как следует из работы [3], обработка холодом не обеспечивает полного превращения остаточного аустенита в случае закалки стали X12M с указанных температур. Его количество будет существенно превосходить объем мартенситной фазы, составляя большую часть от всего объема твердого раствора. Однако на дифрактограммах образцов первой и второй партий линии интенсивности, отражающие содержание γ -фазы (51,7108 и 51,5680°) в области основания основного пика α -фазы, соизмеримы с линиями интенсивности остаточного аустенита на дифрактограммах образцов, закаленных с температур 1040 °C. Это позволяет сделать вывод о том, что проведение отпуска при температуре 550 °C способствует распаду большей части остаточного аустенита в сплаве, закаленном с повышенных температур.

Таким образом, при соизмеримых количествах остаточного аустенита в матрице материала более высокая твердость будет достигнута вследствие применения закалки с температуры 1040 °C и последующего отпуска при температуре 200 °C.

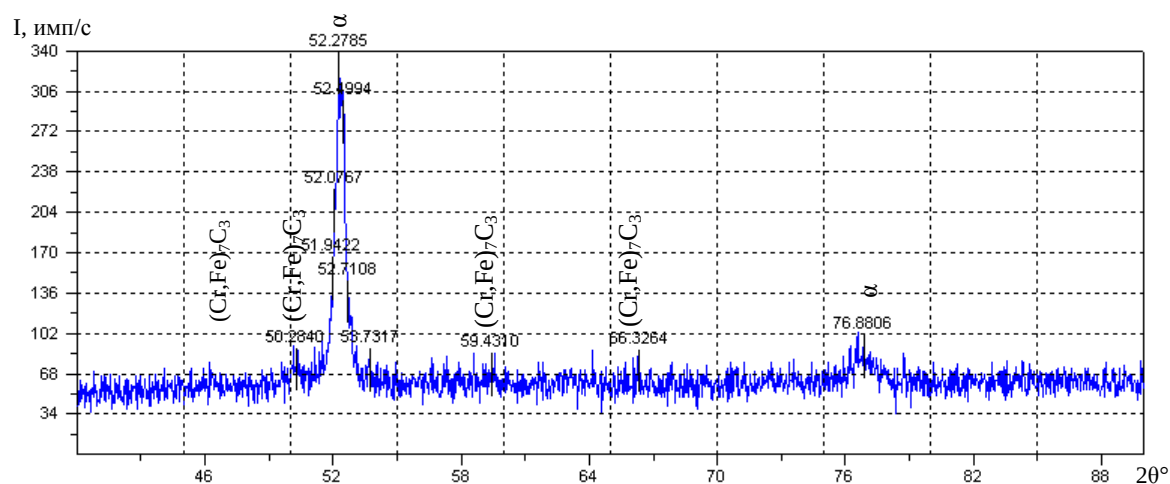


Рисунок 3 – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK_α) стали X12M, подвергнутой закалке с 1140°C с криогенной обработкой и отпуску 560°C

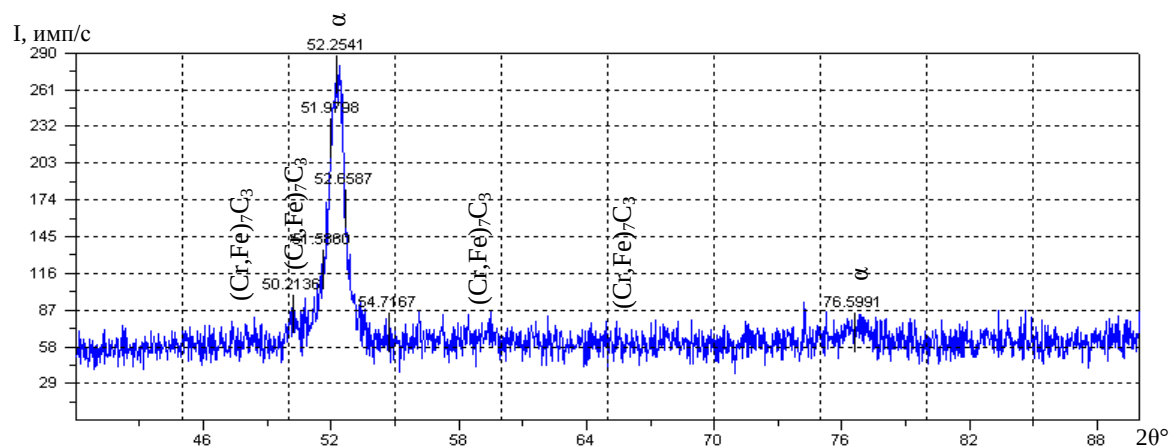


Рисунок 4 – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK_α) стали X12M, подвергнутой закалке с 1170°C с криогенной обработкой и отпуску 560°C

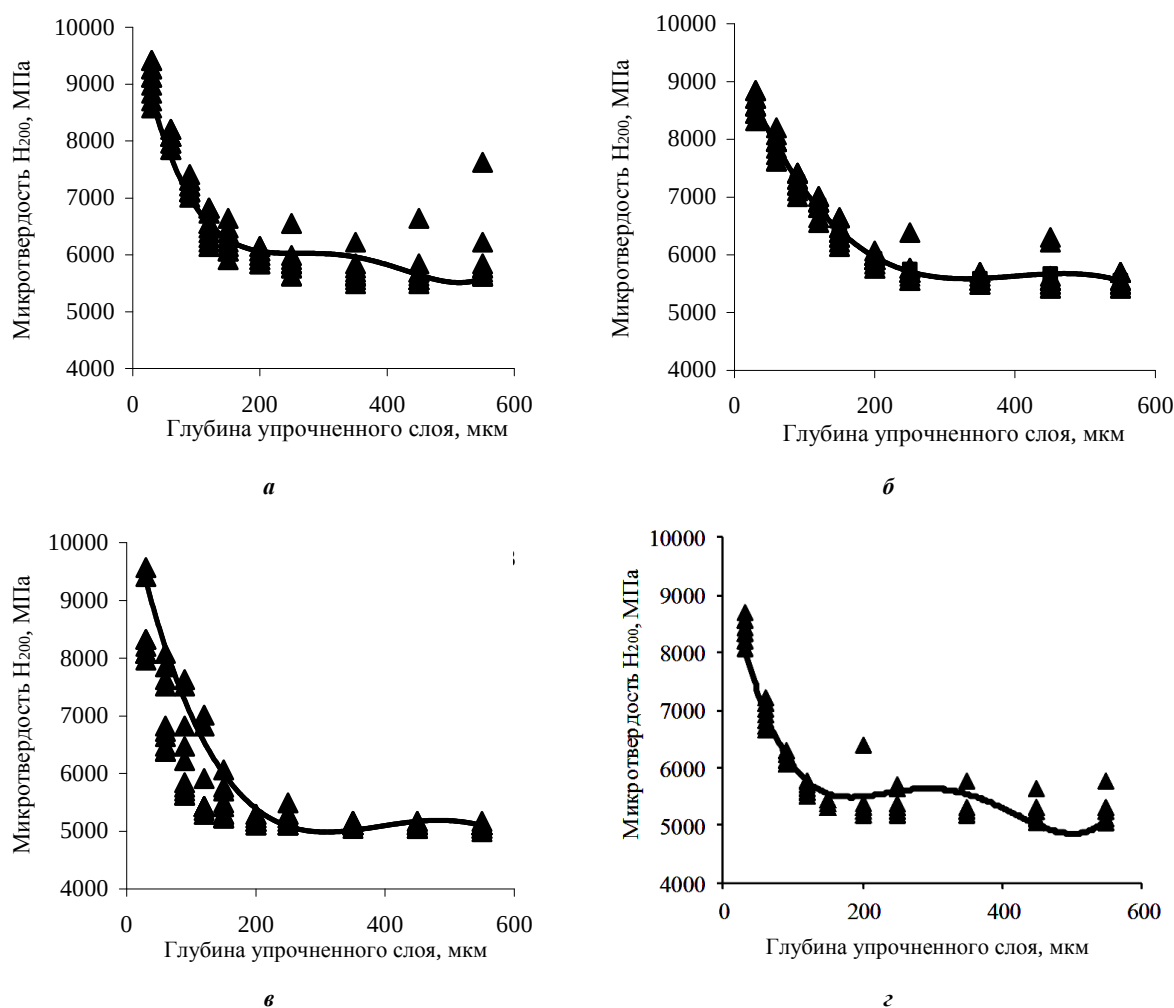
Расчет предела выносливости по зависимостям (1) и (2) показывает, что наибольшей стойкостью к контактному изнашиванию будут обладать образцы этих же партий (табл. 2).

Таблица 2 – Прогнозируемые значения предела контактной выносливости стали X12M с учетом режимов термической и химико-термической обработки, МПа

Технология упрочнения	Партия 1		Партия 2		Партия 3		Партия 4	
Объемное упрочнение в соответствии с таблицей 1	Зависимость (1)	Зависимость (2)	Зависимость (1)	Зависимость (2)	Зависимость (1)	Зависимость (2)	Зависимость (1)	Зависимость (2)
	1357...1403	818...868*	1403...1437	868...893*	1495...1518	986...1067*	1472...1495	953...986*
Финишная нитроцементация, 520	1541**	1133	1518**	1075	1506**	1051	1500**	1046
*Значения чисел твердости по Виккерсу, необходимые для расчетов, получали переводом из значений твердости по Роквеллу. **Значения чисел твердости по Роквеллу, необходимые для расчетов, получали переводом из значений твердости по Виккерсу.								

Следует отметить, что применение двух альтернативных расчетных зависимостей обеспечивает получение существенных различий в значениях предела контактной выносливости. Эта же особенность выявляется при оценке прогнозных величин предела контактной выносливости образцов, упрочненных посредством низкотемпературной нитроцементацией.

Во всех исследованных случаях поверхностная твердость образцов составила 8000...9000 МПа. Общая толщина слоя повышенной твердости приближается к 200 мкм (рис. 5). По данному показателю рассматриваемые модифицированные слои превосходят аналогичные слои, полученные азотированием при низком давлении в течение 3 часов [12]. Основной причиной, по которой длительность вакуумного азотирования ограничена указанным временем, а глубина модифицированного слоя не превысила 100 мм, является формирование по границам зерен матрицы сплошной сетки нитридов, так называемой γ' -фазы. Её присутствие в подповерхностном слое считается нежелательным из-за повышения хрупкости металла вследствие проявления преимущественно интеркристаллитного механизма разрушения.



а – партия 1; б – партия 2; в – партия 3; з – партия 4

Рисунок 5 – Распределение микротвердости по сечению образцов из стали X12M

Структура образцов, подвергнутых низкотемпературной нитроцементации, также отличается присутствием γ' -фазы и наличием ϵ -фазы в виде тонкой прослойки на поверхности металла. При этом в зоне максимального скопления нитридов (γ' -фазы) не образуется сплошная сетка (рис. 6, а), а толщина ϵ -фазы не превышает 2...3 мкм, что не является опасным с точки зрения охрупчивания металла. Поверхностный микрослой сплошной нитридной пленки быстро удаляется с поверхности инструмента при его первых циклах нагружения без формирования глубоких дефектов [7]. В окрестности крупных первичных карбидов, располагающихся в модифицированном слое, выявлены серые приграничные участки, которые по результатам исследований в работе [12] идентифицированы как карбонитридные области, сформированные в результате легирования включений азотом. По всем описанным морфологическим признакам упрочненные слои, сформированные в стали X12M в результате низкотемпературной нитроцементации, соответствуют слоям, полученным азотированием при низком давлении в течение 1...2 часов. При этом возрастание длительности низкотемпературной нитроцементации до 17 часов обеспечивает увеличение

общей глубины упрочненного слоя до 200 мкм без формирования в нем сетки γ' -фазы. При этом высокая твердость упрочненного слоя, согласно зависимостям (1) и (2), должна обеспечить повышение предела выносливости материала (см. табл. 2).

Отличительной особенностью фазового состава сердцевины является практически полное превращение остаточного аустенита, которое произошло после упрочняющей обработки, длившейся 17 часов. Рентгенограммы, полученные с поперечных шлифов образцов всех партий, отличаются идентичным распределением фаз, среди которых выделяются линии главного пика α -фазы и хромистых карбидов M_7C_3 . Значительное сужение пика твердого раствора свидетельствует о протекании некоторой рекристаллизации и укрупнении размеров кристаллических образований, что, в свою очередь, сопровождается снижением твердости сердцевины металла. Практически полный распад остаточного аустенита обеспечивается длительной выдержкой при температуре нитроцементации 520 °С, что подтверждается практически симметричным основанием пика α -фазы, а также высокой степенью химической активности материала матрицы при травлении микрошлифов в 3%-ном растворе HNO_3 в этиловом спирте (рис. 6). В непосредственной близости от основания главного пика α -фазы выявлены линии вторичных фаз, выделившихся в процессе распада аустенита. Их идентификация в некоторых случаях затруднена из-за наложения пиков вторичных карбидов на широкий пик мартенсита и присутствия линий аустенита [13].

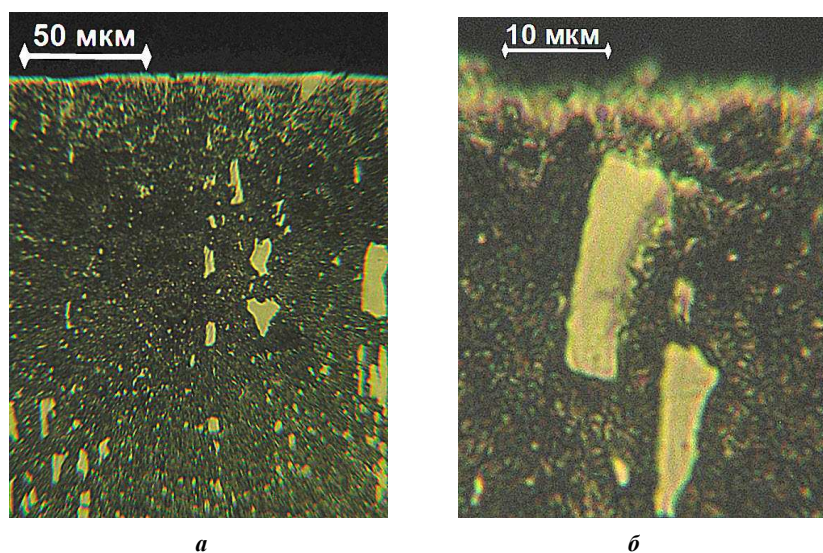


Рисунок 6 – Распределение нитридных включений (γ' -фазы) в поверхностном слое образцов из стали X12M и наружном слое ϵ -фазы (а), легирование границы крупного первичного включения азотом (б) после низкотемпературной нитроцементации сплава

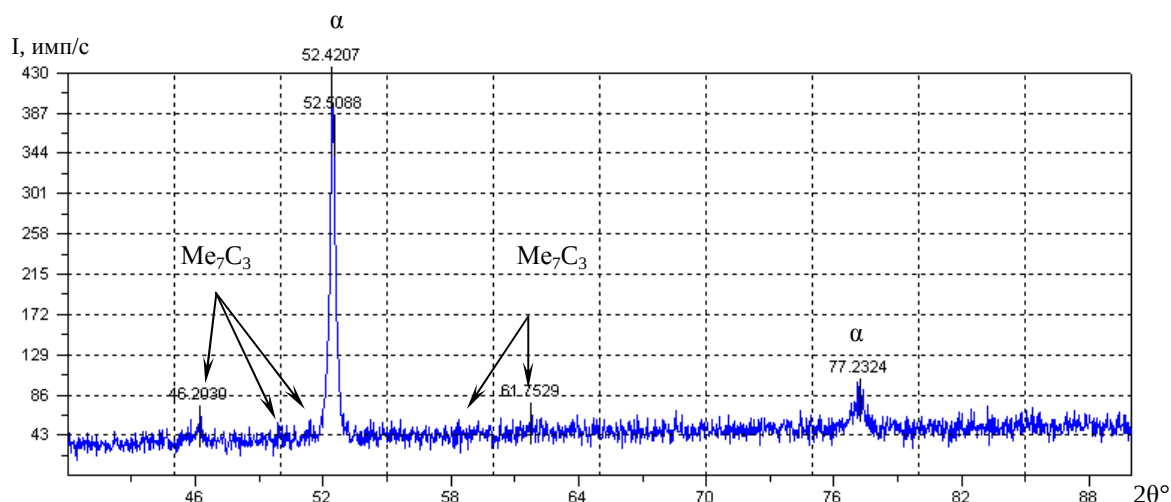


Рисунок 7 – Фрагмент рентгеновской дифрактограммы (CoK_{α}) стали X12M, подвергнутой финишной нитроцементации в течение 17 часов при температуре 520 °С

Заключение. Рассмотрены структура и фазовый состав стали X12M, полученные при различных режимах термической обработки, а также низкотемпературной нитроцементации. Выявлено, что использование традиционных режимов термической обработки стали X12M – закалки с температуры 1040 °С и отпуска при температуре 200 °С обработка холодом – обеспечивает незначительное повышение твердости сплава с 63...64 до 65...66 HRC, что можно объяснить снижением доли остаточного аустенита с 20...25 до 10% [3; 6]. Линии γ -фазы на рентгенограммах в области основания основного пика мартенсита имеют низкую интенсивность, подтверждая преобладание α -фазы в составе металлической матрицы сплава. При этом линии карбидной фазы имеют сходные рефлексы для обоих исследованных случаев, что свидетельствует об отсутствии влияния криогенной обработки на морфологию и состав данной структурной составляющей.

Повышение температуры закалки до 1140 и 1170 °С, сопровождающееся ростом степени легирования аустенита и увеличением его доли в закаленной и обработанной холодом стали, не способствует достижению соизмеримой твердости сплава в результате его дисперсионного твердения после проведения отпуска при температуре 560 °С. Она снижается до величин 58...61 HRC, но при этом доля остаточного аустенита в сплаве, согласно рентгеновским исследованиям, снижается до уровня, достигаемого при закалке с температур 1040 °С и отпуске при 200 °С. Анализ дифрактограмм показывает, что снижение твердости обусловлено уменьшением степени легирования мартенсита за счет выделения из твердого раствора вторичных карбидов на стадии дисперсионного твердения. Полученные результаты свидетельствуют о более высоких эксплуатационных свойствах стали X12M при использовании её для инструмента, работающего в условиях воздействия на поверхность пульсирующих контактных нагрузок за счет сохранения высокой вязкости металлической матрицы. Указанные свойства востребованы при изготовлении сложнопрофильного штампового инструмента с развитой гравюрой [4].

Повышение твердости поверхностного слоя стали X12M обеспечено низкотемпературной нитроцементацией в течение 17 часов при температуре 520 °С. В результате, при достижении общей глубины модифицированного слоя порядка 200 мкм в нем не образовывается сплошной сетки хрупкой нитридной γ' -фазы, как при вакуумном азотировании в случае упрочнения сплава на глубину более 100 мкм, и достигается двукратное увеличение толщины модифицированного слоя. Максимальная микротвердость модифицированного слоя после нитроцементации сопоставима с твердостью азотированного слоя и составляет не менее 8 ГПа. Полученное значение микротвердости является более предпочтительным показателем с точки зрения стойкости материала к контактному изнашиванию, чем у неупрочненного сплава. При этом длительная выдержка при температуре химико-термической обработки обеспечивает практически полное превращение аустенитной фазы в твердом растворе материала, что может быть востребовано при изготовлении пуансонов холодновысадочных автоматов и других деталей оснастки для холодной объемной штамповки, к структуре которых предъявляются требования по недопустимости протекания в металлической матрице сплава процессов динамического старения γ -фазы [14–16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления: ГОСТ 21354-87 (СТСЭВ 5744-86). – М., 1987.
2. Семенов, М.Ю. Анализ способов упрочнения зубчатых колес из теплостойких сталей на основе расчетного метода / М.Ю. Семенов, И.Н. Гаврилин, М.Ю. Рыжова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 20014. – № 1. – С. 42–46.
3. Артингер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка: справ. / И. Артингер. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
4. Макаров, А.В. Повышение износостойкости сплавов железа за счет создания метастабильных и нанокристаллических структур: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 23.12.2009 / А.В. Макаров. – Челябинск, 2009. – 48 с.
5. Слосман, И.В. Термическая обработка штампов из хромистой стали / И.В. Слосман // Изв. Томского ордена Трудового Красного Знамени политехн. ин-та им. С.М. Кирова. – 1954. – Т. 75. – С. 445–457.
6. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали: справ. / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1984. – 584 с.
7. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
8. Степанкин, И.Н. Стойкость холодновысадочной оснастки и методы её повышения / И.Н. Степанкин, В.М. Кенько. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2014. – 197 с.
9. Хейфец, И.Л. Термомеханическая обработка холодновысадочного и резьбонакатного инструмента / И.Л. Хейфец // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – № 11. – С. 37–38.

10. Выдавливание рельефных полостей в формообразующих деталях технологической оснастки: рук. техн. материал: 37.002.0195-81. – Горький, 1983. – 170 с.
11. Каган, А.С. Методика количественного определения остаточного аустенита в текстурированной стали / А.С. Каган, Л.С. Крауш, А.А. Капырин // Заводская лаборатория. – 1985. – Т. 51. – № 2. – С. 57–58.
12. Янушкевич, Б. Роль карбидов в образовании поверхностного слоя стали X153CrMoV12 при азотировании в атмосферах низкого давления (вакуумном азотировании) / Б. Янушкевич, Э. Воловец, П. Куля // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2015. – № 1(215). – С. 31–34.
13. Корнеев, А.Е. Определение остаточного аустенита в сталях мартенситного класса / А.Е. Корнеев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – Т. 72. – № 2. – С. 34–35.
14. Ерёмин, В.И. Исследование разрушения инструмента из высокопрочных штамповых сталей, применяемого для холодной объёмной штамповки: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.01 / В.И. Ерёмин; Харьк. автомоб.-дорж. ин-т им. Комсомола Украины. – Харьков, 1981. – 17 с.
15. Асонов, А.Д. Основные сведения о металловедении и термической обработке / А.Д. Асонов. – М.: Машиностроение, 1972. – 172 с.
16. Касымов, С.А. Прогрессивная технология термообработки штампов для холодного деформирования / С.А. Касымов, Э.А. Мирсалимова // Повышение стойкости инструментальной и технологической оснастки: тез. докл. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 февр. 1980 г. / Белорус. политехн. ин-т. – Минск, 1980. – С. 59.

Поступила 05.02.2016

**TO THE ISSUE OF FORMATION OF STRUCTURE AND HARDNESS
OF SEMIHEAT-RESISTANT STEEL X165CrMoV12 BY HEAT-TREATMENT
AND CHEMICAL HEAT-TREATMENT**

I. STEPANKIN, E. POZDNYAKOV, E. ASTAPOV

The paper discusses the results of the study of structure, phase composition and properties of tool steel X165CrMoV12 in conjunction with the regimes of heat-treatment and chemical heat-treatment. The effect of cryogenic treatment and low-temperature nitriding of the alloy structure formation, tempered with different temperatures are shown. The estimate of the contact fatigue limit was implemented, taking into account the distribution of microhardness of the hardened layer. The recommendations on the choice of thermochemical processing modes ensuring receipt of the highest durability at contact voltages greater than 1000 MPa were given.

Keywords: steel X165CrMoV12, *штамповая оснастка*, hardness, low-temperature nitriding, highest durability at contact voltages.

УДК 621.793.620.172

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЬНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

д-р техн. наук, проф. М.И. ЧЕРНОВИЛ; Т.В. ВОРОНА
(Кировоградский национальный технический университет, Украина);

канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ
(Полоцкий государственный университет);

канд. техн. наук Л.А. ЛОПАТА
(Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев)

Представлены результаты анализа статистических данных долговечности и износостойкости деталей сельскохозяйственной техники. Показано, что износ, коррозия и усталостное разрушение деталей являются главной причиной отказов и, как следствие, приводят к нарушению агротехнических требований и уменьшению урожайности. Предлагается способ создания деталей с износостойкими покрытиями, сочетающий газопламенное и (или) электродуговое напыление сталей ферритного и мартенситного классов с последующим модифицированием напыленных покрытий электроконтактной обработкой.

Ключевые слова: электроконтактная обработка, газопламенное и электродуговое напыление, модифицирование, деформационные структурно-фазовые превращения, термомеханическое воздействие.

Состояние и актуальность проблемы. Повышение долговечности деталей – одна из основных проблем, определяющих направление и темпы развития сельскохозяйственной техники. При эксплуатации детали сельскохозяйственной техники работают в условиях абразивного и коррозионно-механического изнашивания, испытывают комбинированное влияние вибраций, температуры, агрессивных сред и других факторов, что приводит к необратимым процессам изнашивания. Основными факторами, определяющими вид износа рассматриваемых деталей, является среда, динамика и кинематика относительного перемещения трущихся тел, характер контакта и свойства материалов деталей.

На рисунке 1 представлены результаты анализа статистических данных долговечности и износостойкости деталей зерноуборочных и кормоуборочных комбайнов. Быстродействие механизмов копирования жатки зерноуборочных комбайнов в значительной степени определяется работоспособностью шарнирных сопряжений. При эксплуатации шарнирных сопряжений механизмов копирования жаток имеет место выдавливание смазки, что интенсифицирует процессы изнашивания поверхностей трущихся деталей и, как следствие, ухудшает качество работы механизмов копирования рельефа поля, приводит к нарушению технологического процесса уборки, к поломке жатвенного агрегата и потерям зерна. У шнеков жаток зерноуборочных комбайнов в результате деформации витков спирали и изгиба цапф нарушается балансировка (рис. 1, а). В кормоуборочных (рис. 1, б) и кукурузоуборочных комбайнах изнашиваются режущие элементы (ножи и противорежущие пластины), подшипники главного вала, посадочные гнезда корпусов подшипников и посадочные места на валу.

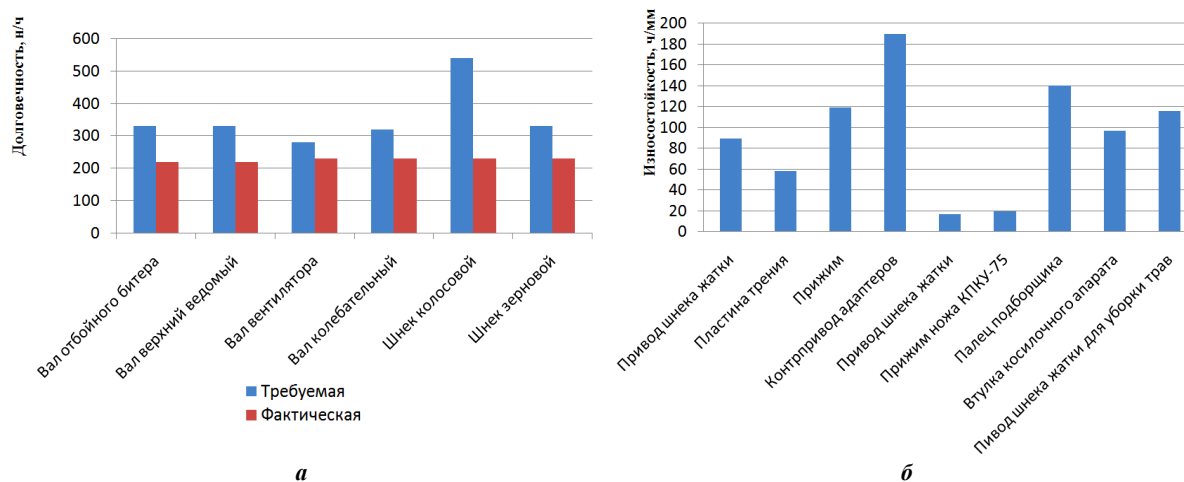
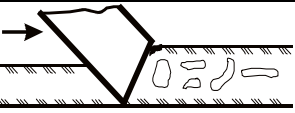
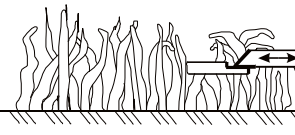
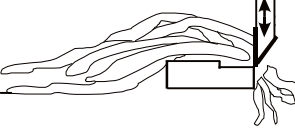


Рисунок 1 – Результаты анализа статистических данных по долговечности (а) и износостойкости (б) деталей зерноуборочных (а) и кормоуборочных комбайнов (б)

Износ режущих элементов кормоуборочных комбайнов обусловлен коррозионно-механическим изнашиванием и определяется кинематическими особенностями процесса резания (табл. 1).

Таблица 1 – Причины отказов рабочих органов сельскохозяйственных машин

Технологическая схема	Вид и условия изнашивания	Примеры изнашиваемых деталей	Доля отказов, %		
			затупление кромки	поломки при ударах	разрушение в результате усталости
	абразивное При перемещении в абразивной среде	Сегменты жаток, детали режущего аппарата, шнеки	80	15	5
	абразивно-механическое При перемещении в абразивной среде	Сегменты жаток, детали режущих аппаратов, шнеки	80	15	5
	абразивно-коррозионно-механическое При измельчении растительной массы	Детали измельчительного барабана кормоуборочных машин	60...70	20...25	10...15

При износе лемеха ухудшаются агротехнические показатели вспашки (неравномерность глубины) и увеличивается тяговое сопротивление плуга. При износе лап культиваторов ухудшаются агротехнические показатели (не срезание сорняков, плохое крошение почвы) и увеличивается тяговое сопротивление культиваторов и почворезов. Основные дефекты лап культиваторов: износ, затупление лезвия и носка, трещины и сколы на рабочей поверхности.

Как показывает практика [4], основной причиной отказов почвообрабатывающих агрегатов типа «агрегат культиваторный широкозахватный» является интенсивное изнашивание сопрягаемых поверхностей корпусных опор. Диски лушпильников, борон и сеялок в процессе эксплуатации затупляются и изнашиваются по толщине и диаметру. На рабочей поверхности возникают сколы, зазубрины, трещины.

У тракторов наиболее быстро изнашиваются детали двигателей, на срок службы которых оказывают влияние условия эксплуатации, в частности режимы его работы. Климатические условия и резкое различие режимов полевых работ приводит к резкому изменению температурного и нагрузочного режимов работы двигателя. В двигателях наиболее быстро изнашиваются канавки поршней, цилиндры, поршневые кольца, клапаны, шейки коленчатого вала, подшипники вала, посадочные гнезда корпусов подшипников и посадочные места на валу. Типичными высоконагруженными деталями, требующими увеличения износостойкости, являются валы. Конструктивная значимость деталей типа «вал» является определяющей в обеспечении работоспособности двигателей тракторов и другой сельскохозяйственной техники. Абразивные частицы и продукты изнашивания, попадая с маслом в подшипники вала, изнашивают его шейки. Шейки коленчатых валов, работающих в соединении с подшипниками, изнашиваются по диаметру. Коленчатые валы могут иметь следующие дефекты: овальность, конусность и повреждения шатунных и коренных шеек; износ посадочных мест под шарикоподшипники муфт сцепления, под шестерни и шкивы вентилятора; износ шпоночных канавок и др. Изнашивание шеек коленчатого вала определяет срок службы двигателя в целом.

Анализ статистических данных дефектов сельскохозяйственной техники показал, что износ и коррозия их деталей составляет 80...90%, а усталостное разрушение – 20...30% (рис. 2), что является главной причиной сравнительно низкого их ресурса и, как следствие, приводит к нарушению агротехнических требований и уменьшению урожайности.

Обобщая результаты исследований по дефектации деталей сельскохозяйственной техники, можно сделать вывод, что в большинстве случаев детали теряют свой ресурс и отказывают в результате изнашивания их рабочих поверхностей.

Наиболее перспективным методом повышения износостойкости малоресурсных деталей сельскохозяйственной (почвообрабатывающей, зерноуборочной, кормоуборочной, перерабатывающей и др.) техники является формирование

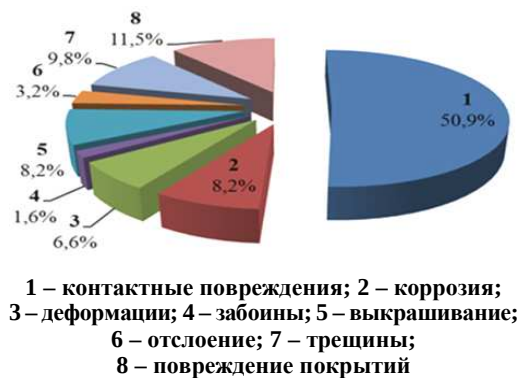


Рисунок 2 – Распределение видов дефектов сельскохозяйственной техники

на ее рабочих поверхностях износостойких слоев из наиболее доступных и низкостойких для покрытий материалов в сочетании с технологиями нанесения покрытий и их последующей обработки.

На основании анализа существующих методов нанесения покрытий, упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной техники в условиях предприятий и мастерских агропромышленного комплекса выбрали газопламенное (ГПН) и электродуговое напыление (ЭДН) (табл. 2) [1]. Эти методы легко реализуются, просты и малозатратны, обладают технологической гибкостью применения к различным типоразмерам деталей. Их эффективность определяется следующими показателями: производительностью от 1 до 100 кг/ч; толщиной покрытий от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров; отсутствием деформации изделий при нанесении покрытия (температура нагрева изделия при напылении не превышает 150...200°C); простотой и мобильностью оборудования; возможностью нанесения покрытий на локальные участки и большие поверхности деталей. Покрытия, полученные ГПН и ЭДН, имеют пористую поверхность. Такие покрытия легко прирабатываются, сохраняют смазку, удовлетворяют основным свойствам антифрикционности (самосмазываемость, самопритираемость), поэтому работают в условиях ограниченной смазки, улучшают противозадирную стойкость пары трения [1].

Таблица 2 – Характеристика способов ГПН и ЭДН

Параметр	Способы газотермического напыления	
	ЭДН	ГПН
Производительность, кг/ч	3...31	1...10
Коэффициент использования материала	0,8...0,9	0,8...0,95
Температура нагрева детали, °C	100...150	100...150
Прочность сцепления, МПа	до 40	до 50
Пористость, %	10,0...30,0	16,0...35,0

При ГПН источником тепловой энергии является газовое пламя, образующееся в результате горения смеси «кислород (сжатый воздух) – горючий газ (ацетилен, пропан-бутан, природный газ и др.)». Метод ГПН находит применение: для формирования антифрикционных покрытий на сопрягаемых поверхностях корпусных опор; защиты от износа рабочих органов сельскохозяйственных машин (лемеха и долота плугов, лапы сеялок и культиваторов, ножи и противорежущие пластины кормоуборочных комбайнов); при восстановлении изношенных и упрочнении новых деталей тракторов; нанесении антикоррозионных покрытий [1].

В мировой практике упрочнения, восстановления и антикоррозионной защиты деталей метод ЭДН [1] получил значительное распространение как один из самых технологичных и производительных методов (см. табл. 2). Сущность процесса электродугового напыления заключается в нагреве (до плавления) электрической дугой сходящихся проволок и распылении расплавленного металла сжатым воздухом или газовым потоком. Методом ЭДН можно восстанавливать детали, обеспечивая их износостойкость на уровне новых деталей, и наносить покрытия, которые по качеству не уступают покрытиям, нанесенным плазменным и детонационным методами. Это обусловлено многими достоинствами метода: высокой тепловой эффективностью, достигающей 57%, по сравнению с 17% при плазменном напылении; распространенностью и доступностью источника энергии; отсутствием значительного термического влияния на деталь, деформация которой неизбежна при наплавке; низкой себестоимостью восстановления деталей (удельная себестоимость нанесения покрытия в 1,4...1,8 раза ниже, чем при наплавке); преимущество ЭДН перед наплавкой по трудоемкости (продолжительность наплавки 1 ч 10 мин, продолжительность ЭДН – 24 мин). Свойства ЭДН покрытий: износостойкость в 1,5...1,8 раза выше закаленной стали 45; стабильность усталостной прочности; способность работать длительное время без доступа смазки до момента схватывания. Электродуговое напыление используется для антикоррозионной защиты металлоконструкций, защитно-декоративных целей, создания антифрикционных покрытий, восстановления деталей цилиндрической и плоской формы, которые работают в условиях трения скольжения и смазки. Методом ЭДН наносят покрытия:

- 1) с повышенной износостойкостью и прочностью сцепления на поверхности деталей, которые работают при ударном нагружении, в условиях знакопеременных и высоких контактных нагрузок;
- 2) на крупногабаритные, тонкостенные и длинномерные детали, на которых невозможно оплавление покрытий из-за их большой массы или коробления в процессе оплавления [1].

Однако ЭДН- и ГПН-покрытия из сталей имеют максимально достигаемую твердость в пределах 35...50 HRC, из-за выгорания углерода в процессе напыления, что существенно снижает их износостойкость. Поэтому разработка эффективных способов изготовления деталей с ГПН- или ЭДН-покрытиями повышенной износостойкости выступает как *актуальная задача*.

Несмотря на большое количество разработок в области повышения твердости и износостойкости ГПН- и ЭДН-покрытий, в настоящее время исследования приобрели направленность на активирование процессов напыления и (или) их модифицирование (рис. 3) [2]. На практике реализуются следующие приемы активации процесса напыления: интенсификация процесса смешения рабочих газов; сообщение дополнительной энергии частицам напыляемого материала путем их нагрева, ускорения или того и другого одновременно; сообщение дополнительной энергии подложке путем ее предварительного нагрева; уменьшение среднего размера распыленных частиц; повышение активности поверхности частиц и подложки механическим (повышение шероховатости) или химическим (восстановление окислов) путем и т.п.; нанесение покрытий при внешнем воздействии (ультразвуковые колебания, электромагнитное поле и т.д.); последующая термообработка покрытия.



Рисунок 3 – Основные направления повышения износостойкости ГПН- и ЭДН-покрытий

Объединение нанесения покрытий с модификацией поверхности позволяет создать комбинированные методы инженерии поверхности (интегрированные технологии), преимуществами которых является высокий уровень физико-механических свойств и возможность модифицирования рабочей поверхности [3]. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, восстановление-упрочнение деталей наиболее эффективно путем нанесения на рабочие поверхности защитных покрытий интегрированными технологиями. Модифицирование поверхности деталей, возможно, проводить как изменением структуры поверхностных слоев, так и изменением химического состава. К методам модифицирования относят различные способы нанесения покрытий и химико-термическую обработку или их комбинации. Повышают износостойкость и прочностные свойства электродуговых и газопламенных покрытий лазерной, ультразвуковой и другими методами обработки (см. рис. 3).

Таким образом, в данной работе предлагается решить проблему создания деталей сельскохозяйственной техники из низкоуглеродистых сталей с износостойкими покрытиями путем активирования процессов ГПН и (или) ЭДН сталей ферритного и мартенситного классов и их последующее модифицирование при помощи электроконтактной обработки (ЭКО). При этом используется подход, в основе которого лежит создание и целенаправленное управляемое использование деформационных структурно-фазовых превращений и метастабильных состояний, обеспечивающих комплексное улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, а следовательно и рабочих поверхностей деталей.

Цель исследований – установление влияния ЭКО на структурно-фазовые превращения в покрытиях, полученных ГПН и ЭДН, сталей мартенситного и ферритного классов во взаимосвязи с их физико-механическими свойствами для повышения износостойкости деталей сельскохозяйственной техники.

Результаты исследований. При активированном электродуговом напылении (АДН) в качестве распыляющего газа используются продукты сгорания пропано-воздушной смеси, что позволяет значительно снизить окисление напыляемого металла и выгорание легирующих элементов [2]. Так, количество углерода в покрытии, полученном из проволоки 40Х13, практически не отличается от его содержания в исходной проволоке. Коэффициент использования материала при АДН возрастает и достигает значения, равного 0,85. Сравнительный анализ свойств покрытий показал, что прочность сцепления покрытий, наносимых АДН, выше в 1,8...2,2 раза [2].

Применение рассмотренных выше методов увеличения прочности и износостойкости ГПН- и ЭДН-покрытий ограничено из-за ряда недостатков [3]. В частности, лазерная и электронно-лучевая обработка приводят к неоднородной макроструктуре поверхности. Химико-термическая обработка (ХТО) характеризуется большой продолжительностью процесса и не позволяет проводить обработку крупногабаритных изделий. При обработке необходимо стремиться к использованию способов с минимально необходимым нагревом (высокие температуры отрицательно сказываются на «объемных» свойствах упрочняемых деталей) и малыми величинами припусков на финишную обработку. Технологии, сочетающие методы формирования покрытий и последующее их модифицирование, позволяют повысить твердость и износостойкость ГПН- и ЭДН-покрытий.

Высокую износостойкость, твердость и прочие свойства ЭДН- и ГПН-покрытий можно обеспечить такими методами модифицирования, как механо-термическое упрочнение (МТУ). Значительное повышение износостойкости после механотермической упрочняющей обработки (МТУО) объясняется положительной стороной механического фактора – взаимодействие материалов в твердой фазе активируется не только температурой, но и давлением. Наибольшее распространение среди МТУО получила схема электроконтактного нагрева при прокатке покрытий роликом [3]. При этом максимальная износостойкость может быть достигнута при условиях, обеспечивающих наибольшую дисперсность и микроискажения кристаллической структуры. Структура покрытия зависит от температурно-силовых параметров МТУО [3].

Электроконтактная обработка обеспечивает при сохранении исходных «объемных» механических свойств деталей упрочняющий эффект и позволяет: заменить высоколегированные дефицитные материалы для покрытий на менее затратные; снизить требования к механическим свойствам напыляемого материала; заменить финишную механическую обработку на поверхностное пластическое деформирование (ППД) до требуемых размеров детали и чистоты поверхности; заменить традиционную наплавку с ее трещинами и необходимостью финишной механической обработки при обеспечении толщин покрытий $h > 3$ мм с высокой адгезионной прочностью и низким уровнем остаточных напряжений [3].

Электроконтактная обработка осуществляется под давлением при прямом пропускании электрического тока (рис. 4), ее достоинствами являются: высокая производительность; низкая энергоемкость; отсутствие светового излучения и газовыделения; исключена необходимость в защитных средах; минимальные тепловложения.

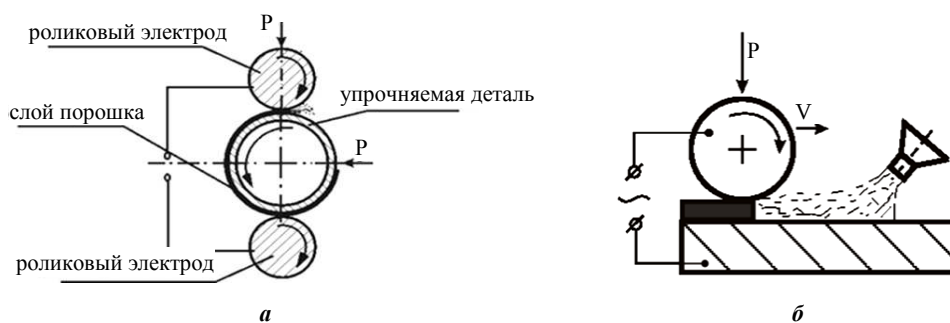


Рисунок 4 – Технологическая схема электроконтактной обработки (а) и схема ЭКО газопламенных и электродуговых покрытий (б)

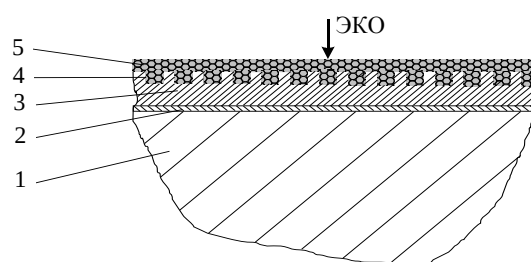
Зона термического влияния (ЗТВ) при воздействии электрического тока на деталь составляет 0,2...1,0 мм вследствие малой длительности нагрева. Отсутствие жидкой фазы в зоне нанесения покрытия повышает долговечность электрода, снижает потери материала покрытия, позволяет увеличить толщину износостойкого слоя в 3...6 раз при минимальном уровне остаточных напряжений и прочности сцепления более 200 МПа. Пористость покрытий не превышает 5%. Высокое качество покрытий с использованием ЭКО обеспечивается импульсным характером процесса. Импульсные методы характеризуются большими энергетическими возможностями и экономичностью [4]. Электроконтактная обработка позволяет осуществлять финишную обработку ЭДН- и ГПН-покрытий до требуемого размера и чистоты поверхности без припусков или при значительном их уменьшении. Использование комбинации ГПН/ЭДН и последующей ЭКО открывает широкие возможности в создании износостойких покрытий [5; 6].

При проектировании комбинированной технологии создания покрытий ГПН/ЭДН+ЭКО целесообразно использовать подход, в основе которого лежит создание и целенаправленное управляемое использование деформационных структурно-фазовых превращений и метастабильных состояний, обеспечивающих комплексное улучшение их физико-механических и эксплуатационных свойств. Главной особенностью этого подхода является способность материалов покрытий к определенным фазовым превращениям и структурным изменениям при их нанесении и упрочняющей обработке [7]. В качестве таких материалов для износостойких покрытий было предложено использовать наиболее доступные и низкозатратные стали мартенситного и ферритного классов (табл. 3), главной особенностью которых является способность к структурно-фазовым превращениям при термомеханическом воздействии.

Таблица 3 – Проволочные стали мартенситного (40X13) и ферритного (Св-08) классов

Марка материала	Концентрация элементов, % мас.							Твердость после напыления, HV
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	Fe	
40X13	0,42	13,4	0,54	0,13	0,44	0,27	основа	360...420
Св08	0,06	0,1	–	–	0,40	0,25	основа	250...300

При термомеханическом воздействии в этих сталях происходит аустенитно-мартенситное превращение, которое влияет на твердость, сопротивление деформации и износостойкость. Процесс превращения аустенита в мартенсит деформации и сопутствующие этому явления поглощают большое количество энергии. Возрастание способности металла к поглощению энергии приводит к повышению сопротивляемости изнашиванию. Мартенсит, возникающий при деформации аустенита под действием приложенных извне напряжений обладает повышенной прочностью. Интенсивность упрочнения пропорциональна количеству мартенсита деформации, зависящему от степени пластической деформации в контакте и температуры, при которой происходит деформирование. В мартенсите деформации образуются сегрегации углерода такого же типа, как и при старении, что должно приводить к дополнительному упрочнению. В результате пластической деформации стали при температурах мартенситного превращения количество мартенсита увеличивается. Образование того или иного структурного типа мартенсита обусловлено температурой его формирования, которая зависит от состава сплава и других факторов. Мартенситную структуру получают при быстром охлаждении системы «Fe – C», находящейся в области аустенитного или аустенитно-ферритного состояния. Вследствие аустенитно-мартенситного превращения в структуре стали наряду с мартенситом присутствует и остаточный аустенит. При термомеханическом воздействии пластически деформированный аустенит находится в метастабильном состоянии и характеризуется изменением многих его параметров: увеличением сопротивления деформации, структурными превращениями, искажением кристаллической решетки и т.п. Поэтому максимальная износостойкость достигается в случаях, когда в структуре сплавов содержится метастабильный аустенит, способный к деформационным превращениям. Значительная износостойкость сплавов, в структуре которых содержится метастабильный аустенит, объясняется его высокой способностью к наклепу, легированностью, особенностями строения кристаллической решетки, в которой затруднено слияние линейных дислокаций в полостные с образованием зародышевых трещин, представляющих начальную стадию разрушения.



1 – основа (сталь Ст 3); 2 – подслои (сталь X20H80); 3 – пористое ГПН/ЭДН покрытие (40X13/Св08); 4 – поры в поверхностном слое напыленного покрытия 3; 5 – углеродсодержащая обмазка

Рисунок 5 – Схема износостойкого покрытия

В результате проведенных исследований разработаны схема и способ создания износостойких стальных покрытий, включающие ГПН- и ЭДН-покрытия и их ЭКО. Схема получения износостойкого покрытия (рис. 5) представлена в виде технологической цепочки методов их нанесения и обработки с указанием значений основных технологических параметров этих методов (табл. 4).

Выявлено, что режимы электроконтактной обработки покрытий из сталей мартенситного и ферритного классов значительно отличаются. Покрытия, полученные газопламенным и электродуговым напылением сталей ферритного класса (Св-08), допускают более «жесткую» ЭКО. Покрытия, полученные газопламенным и электродуговым напылением сталей мартенситного класса (40X13), требуют более «мягких» режимов ЭКО.

При разработке способа использовали подход, в основе которого лежат структурно-фазовые превращения при ЭДН/ГПН и при ЭКО напыленных слоев, которые обеспечивают повышение износостойкости покрытий. В результате исследований установлена взаимосвязь физико-механических свойств стальных покрытий со структурно-фазовыми превращениями в них; обнаружено, что уровень этих свойств, кон-

тролируемый степенью насыщения мартенситной фазы углеродом, повышается с увеличением содержания углерода и карбидных включений в сталях, а также при насыщении покрытия углеродсодержащими модификаторами (коллоидным графитом, ультрадисперсным алмазо-графитовым порошком (УДАГ)); выявлено, что ЭКО стальных покрытий снижает их пористость, увеличивает содержание оксидов в поверхностном слое, уменьшает концентрацию остаточного аустенита (вследствие разогрева поверхности до 1200 °С) в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращений и позволяет осуществлять модифицирование. Достоверность полученных результатов была подтверждена результатами исследований фазового состава покрытий, микроструктуры ГПН- и ЭДН-покрытий их проволочных сталей 40X13 и Св08 в исходном состоянии и после их ЭКО (табл. 5).

Таблица 4 – Методы и режимы формирования износостойких покрытий

Метод	Режимы			
	Тип покрытия	Горючая смесь	Расстояние, мм	Толщина слоя, мм
Газотермическое напыление (нанесение покрытия)	40X13	Ацетилен + кислород	150,0	1,0...1,2
Электрохимическая полировка (вскрытие пор)	Состав электролита	Температура электролита, °С	Плотность тока J , А/см ²	Время, мин
	H ₃ PO ₄ (760 г) + CrO ₃ (100 г)	40...50	0,5	10,0
Ультразвуковая обработка	Тип модификатора	Частота колебания, Гц	Время, мин	Среда обработки
	Порошок УДАГ 0,5% об.	44,0	7,0...8,0	Спирт этиловый C ₂ H ₅ ОН
Электроконтактная обработка (как с углеродными модификаторами, так и без них)	Ток нагрева, I, кА	Давление, P, МПа	Время нагрева, T _н , с	Время импульсов-пауз, t, с
	3,5	20,0	8-10	0,02...0,04

Таблица 5 – Фазовый состав покрытий из проволочной стали Св-08 и 40X13

Материал покрытия	Метод нанесения покрытия	Фазовый состав			
		Исходное	+ ЭКО	+ ЭКО + С	+ ЭКО + УДАГ
Св-08	ЭДН	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄
Св-08	ГПН	α -Fe; FeO	–	–	α -Fe; FeO; Fe ₃ C; γ -Fe
40X13	ЭДН	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄ ; γ -Fe	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄ ; γ -Fe	α -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄ ; γ -Fe	α -Fe; FeO; γ -Fe
40X13	ГПН	α -Fe; γ -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄	–	–	α -Fe; γ -Fe; FeO; Fe ₃ O ₄

Для исследования фазовых и структурных превращений в напыленных слоях при ЭКО (см. табл. 5) использовался рентгеноструктурный анализ (дифрактометр ДРОН-3.0, монохроматизированное CoK $_{\alpha}$ -излучение, V = 30 кВ, I = 10 мА). В качестве модификаторов использовался коллоидный графит и ультрадисперсная алмазо-графитная смесь УДАГ-СП (ТУ РБ 28619110.001-95). Ультрадисперсная алмазосодержащая шихта состоит из алмазной и графитоподобной фаз со средним размером углеродных кластеров 10...30 нм. Соотношение интенсивностей дифракционных линий <111> алмаза и <002> графита позволяет оценить соотношение объемных долей алмазной и графитоподобной фаз как 30:70.

С фазовыми превращениями, протекающими в слое при напылении, связан характер распределения микротвердости по глубине покрытия. При этом необходимо иметь в виду, что первые порции напыляемых капель расплавленной стали 40X13 падают на холодную поверхность подложки и быстро охлаждаются, что приводит к реализации в них мартенситного превращения. Напыление следующих порций расплавленных капель стали 40X13 сопровождается повторным разогревом ранее закристаллизованного покрытия и протеканием в нем процессов самоотпуска, приводящего к снижению твердости прилегающего к подложке напыленного слоя. В то же время в самом свеженапыленном слое вследствие замедленной скорости его охлаждения на разогретой до 250...300 °С ранее закристаллизованной поверхности сохраняется повышенное количество остаточного аустенита [1]. При этом стабилизация остаточного аустенита в поверхностных слоях покрытия связана с его изотермической выдержкой в области повышенной устойчивости аустенита при охлаждении [2].

Выводы. Итогом проведенных исследований выступают следующие результаты:

- предложен новый подход к получению газотермических стальных покрытий на низколегированных сталях с повышенной износостойкостью, в основе которого лежит создание и целенаправленное управляемое использование деформационных структурно-фазовых $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращений и метастабильных состояний путем температурно-силового воздействия при их электроконтактной обработке;
- представлена оригинальная схема и способ конструирования стальных покрытий, которые включают газотермическое нанесение металлического подслоя для обеспечения адгезии, нанесение стального износостойкого покрытия методом ГПН/ЭДН с последующей ЭКО;

- установлена взаимосвязь физико-механических свойств стальных покрытий со структурно-фазовыми $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращениями в них и показано, что уровень этих свойств, контролируемый степенью насыщения мартенситной α -фазы углеродом, увеличивается с увеличением содержания углерода и карбидных включений в сталях;

- разработаны практические рекомендации для создания износостойких покрытий из сталей мартенситного и ферритного классов для восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники.

На рисунке 6 представлены детали с износостойкими покрытиями.

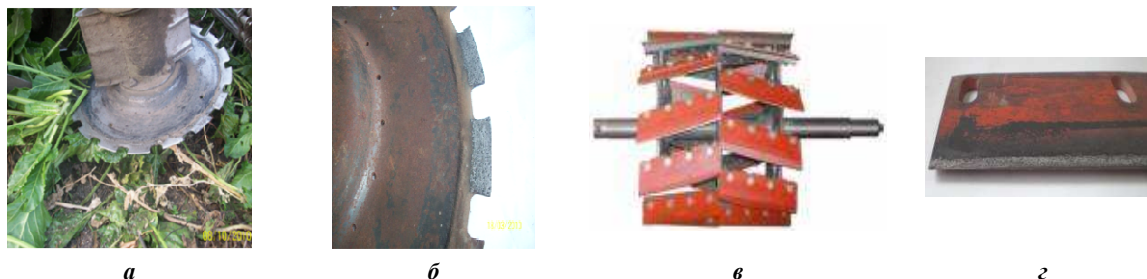


Рисунок 6 – Ножи с покрытиями свеклоуборочных машин (а, б) и измельчительного барабана (в, г) комбайна

ЛИТЕРАТУРА

1. Структура и свойства покрытий из стали 40X13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления / П.А. Витязь [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 1. – С. 15–22.
2. Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 10. – С. 39–44.
3. Корж, В.Н. Комбинированные методы инженерии поверхности / В.Н. Корж, Т.В. Ворона, А.В. Лопата // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: матер. 4-ї міжнарод. наук.-практ. конф., Чернігів, 19–21 травня 2014 р. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – С. 159–163.
4. Черновол, М.И. Повышение износостойкости газотермических покрытий из железуглеродистых сплавов электроконтактной обработкой / М.И. Черновол, Т.В. Ворона, Л.А. Лопата // Техніка в сільсько-господарському виробництві, галузове машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту / КНТУ. – Кіровоград. – 2015. – Вип. 28. – С. 230–236.
5. Получение износостойких напыленных покрытий / М.И. Черновол [и др.] // Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 14-й междунар. науч.-техн. конф., Савлява, 2–6 июня 2014 г. – Киев: АТМ України. – С. 149–151.
6. Способ получения износостойких покрытий / М.И. Черновол [и др.] // Инженер-механик: республ. межотрасл. Производств.-практ. журнал. – 2015. – № 2 (67). – С. 38–39.
7. Структурно-фазовые превращения в газотермических стальных покрытиях в процессе их напыления и последующей электроконтактной обработки / М.И. Черновол [и др.] // Проблема тертя та зношування: наук.-техн. журнал. – Київ, НАУ, 2015. – № 2(67). – С. 99–109.

Поступила 20.12.2015

STRUCTURAL AND PHASE TRANSFORMATIONS AND MODIFYING IN ELECTROCONTACT TREATMENT GAS-THERMAL OF STEEL COATING

M. CHERNOVOL, T. VORONA, O. SHTEMPEL, L. LOPATA

The results of the analysis of statistical data durability and wear resistance of details of agricultural machinery. It is shown that the wear, corrosion and fatigue failure of parts are the main cause of their exit from the building, and as a result – a violation of agro-technical requirements and reducing yields. This paper proposes a method of creating parts with a wear-resistant coating, which combines gas-flame, and (or) electric arc spraying steels ferritic and martensitic grades, and the subsequent modification of sprayed coatings electrocontact treatment.

Keywords: integrated technology, integrated or combined methods for hardfacing, hybrid technology, electric arc spraying, electric-spark doping, ion.

УДК 621.762.2

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМ Fe–SiC И Fe–B₄C
МЕТОДОМ МЕХАНОСИНТЕЗА*д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК; С.А. КОВАЛЁВА; канд. техн. наук Н.С. ХОМИЧ**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);**д-р хим. наук Т.Ф. ГРИГОРЬЕВА**(Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск);**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет);**С.В. ГРИГОРЬЕВ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Приведены результаты исследований структуры композиционных порошковых материалов состава Fe–SiC и Fe–B₄C, получаемых в условиях интенсивной механической активации, и их магнитно-абразивных свойств. Показано, что при обработке смеси порошков Fe и абразивов (SiC и B₄C) в мельнице с энергонапряженностью $I = 3 \text{ Вт/г}$ формирование композитов состава Fe–SiC и Fe–B₄C наблюдается уже при малой длительности воздействия (до 10 мин). Основные этапы формирования микроструктуры композиционных порошков Fe–абразив включают измельчение, деформационное перемешивание и фрагментацию субмикроструктуры компонентов с образованием глобулярной микроструктуры. При длительности активации 60 мин в частицах происходит выравнивание по фазовому составу и размерному диапазону как механокомпозитов Fe–абразив, так и абразивных включений. Измельчение частиц SiC в таких условиях происходит в большей степени, чем B₄C. Образование композита Fe–SiC в условиях активации с длительностью 60 мин происходит без существенных химических взаимодействий между компонентами, в то время как в системе Fe–B₄C наблюдается образование фазы B₆Fe₂₃.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, магнитно-абразивные композиты, механическая активация, микроструктура, механокомпозиты, планетарная шаровая мельница.

Одним из перспективных методов получения порошковых композитов является интенсивная механическая активация [1], которая в условиях локальных импульсных ударно-сдвиговых воздействий позволяет создавать наноструктурированные порошки на основе разнородных классов химических соединений. В настоящее время большой интерес представляет получение порошковых магнитно-абразивных сред, применяемых для финишного магнитно-абразивного полирования [2]. Достоинствами данного способа являются широкие формообразующие возможности, высокий уровень универсальности и технологической гибкости, при этом производительность процесса полирования и качество обрабатываемой поверхности определяются как ферромагнитными свойствами порошков, так и их режущими свойствами.

Обычно в качестве магнитно-абразивной рабочей среды используют смеси порошков железа и материалов с высокой твердостью и режущей способностью, таких как оксид алюминия, карбид бора, карбид кремния, диоксид кремния, оксид хрома, алмаз и т.п. Композиты такого состава преимущественно получают металлургическим методом – спеканием и синтезом с последующим размолотом [3–5]. Однако такой способ получения характеризуется высокими энергетическими затратами, низким выходом готового продукта, невозможностью получения размолотых частиц в узком размерном диапазоне, слабой адгезией абразивных частиц к ферромагнитным составляющим получаемых композиционных порошков и неравномерным распределением абразивных частиц по объему, что приводит к неоднородности получаемого рельефа поверхности. Агломерация абразивных частиц ведет к образованию на поверхности грубых рисок и задигов.

Цель данной работы – получение композиционных частиц состава Fe–SiC и Fe–B₄C методом механо-синтеза (механокомпозитов). При данном способе получения композиционных порошков Fe–абразив регулирование степени взаимного перемешивания, размера частиц и реакционной способности композиций может быть достигнуто путем изменения длительности обработки.

Материалы и методы исследований. В работе использовали порошки карбонильного железа (ПЖК) с размером частиц $d_4 = 140...180 \text{ мкм}$, карбида кремния монокристаллического α -SiC с кристаллической структурой типа вюрцита, а также карбида бора B₄C (R-3m) с размером частиц $d_4 = 40...180 \text{ мкм}$.

Учитывая высокую режущую способность относительно алмаза исходных частиц карбида бора (0,5...0,6) и карбида кремния (0,25...0,45), состав порошковой смеси рассчитывали из соотношения компонентов Fe и абразива как 60:40 об.%, что соответствует составам Fe + 16,7 мас.% B₄C и Fe + 20 мас.% SiC.

Механическую активацию порошковых смесей проводили в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице Активатор-2S (пр-во ЗАО «Активатор», Новосибирск) с энергонапряженностью I ,

равной 3 Вт/г, рассчитанной, согласно [6], при соотношении частот вращения планетарного диска и барабанов $-2 \dots 1$ в воздушной атмосфере при водяном охлаждении в течение $t = 5, 10, 20$ и 60 мин, что соответствует дозам механической энергии $D = I \cdot t = 0,9; 1,8; 3,6$ и $10,8$ кДж/г. Масса порции обрабатываемого порошка составляла 60 г, масса шаровой загрузки – 370 г.

Изучение фазового состава порошковых композитов проводили на дифрактометре D8 Advance в характеристическом излучении $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) с использованием базы данных рентгенографических стандартов ICDD PDF-2. Расчет и уточнение профильных и микроструктурных параметров (среднего размера кристаллитов $\langle L \rangle$ и микронапряжений $\Delta d/d = \epsilon$) выполняли с использованием функции псевдо-Фойгта (Pseudo-Voigt) и проведением полнопрофильного разложения дифрактограмм в угловом диапазоне $2\theta = 30 \dots 120^\circ$ по процедуре Pawley в ПО «ТОПАС» [7].

Для исследования микроструктуры полученных образцов механокомпозитов использовали оптический микроскоп Микро 200 (пр-во НПО «Планар», г. Минск) и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) высокого разрешения MIRA\TESCAN с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Диаметр электронного зонда составил $5,2 \text{ нм}$, область возбуждения – 100 нм .

Изучение абразивных свойств полученных механокомпозитов проводили на установке магнитно-абразивного полирования модели T10, предназначенной для финишной обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, на образцах циркониевого сплава с последующим анализом весового и размерного сема материала. Измерение шероховатости проводилось согласно ГОСТ 2789-73 на приборе «MarSurf PS1» фирмы Mahr (Германия). В качестве наиболее предпочтительного выбран параметр среднеарифметического отклонения профиля R_a .

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рисунке 1 приведены дифрактограммы порошковой смеси железа и карбида кремния, механоактивированных при различных дозах D .

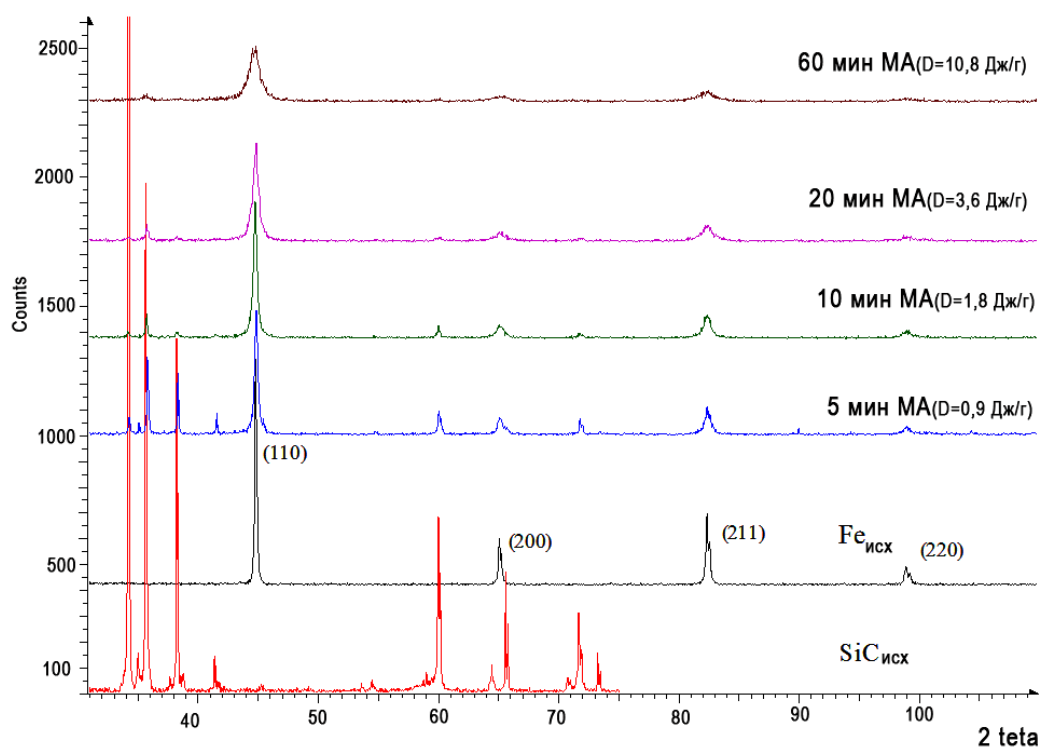


Рисунок 1 – Дифрактограммы продуктов механоактивации смеси Fe-SiC с различной длительностью обработки

Увеличение дозы введенной механической энергии с $D = 0,9$ кДж/г до $D = 10,8$ кДж/г приводит к существенному снижению интенсивности дифракционных отражений железа и значительному их уширению, что обусловлено уменьшением размеров кристаллитов и ростом внутренних микронапряжений (см. рис. 1; табл. 1).

Интенсивности дифракционных отражений карбида кремния также существенно снижаются и при значениях $D = 10,8$ кДж/г едва превышают фон. Следует отметить, что при механообработке с дозой механической энергии $D = 1,8$ кДж/г фрагментация частиц карбида кремния происходит менее интенсивно, чем железа, что обусловлено его более высокими прочностными свойствами, и достигают уровня $\langle L \rangle_{\text{Fe}} = 40 \text{ нм}$ и $\langle L \rangle_{\text{SiC}} = 120 \text{ нм}$. Дальнейшее измельчение кристаллитов ниже $\langle L \rangle = 40 \text{ нм}$ компонент SiC и Fe проис-

ходит значительно медленнее. В фазе карбида кремния с увеличением дозы механической энергии до $D = 10,8$ кДж/г и уменьшением размера кристаллита до $\langle L \rangle = 16$ нм происходит резкое снижение уровня микронапряжений, что может свидетельствовать о снижении количества дефектов в кристаллитах. Изменения параметров решетки (a) фазы железа незначительны (табл. 1). Можно предположить, что тонкодисперсные частицы карбида кремния при механической активации распределяются по границам железа без существенного взаимодействия с последним. Образование карбидов железа или присутствие чистого кремния рентгенографически не регистрируется, что, по нашему мнению, подтверждает предположение об отсутствии химического взаимодействия между компонентами в процессе механической активации смеси Fe-SiC.

Таблица 1 – Микроструктурные параметры фаз порошковой смеси Fe-SiC при механической активации

Длительность МА, мин	a , c Å		ОКР, нм		ε , %	
	Fe	α SiC	Fe	α SiC	Fe	α SiC
Исхдное	2,866(4)	3,081 37,78	161	–	0,0027	–
5	2,866(9)	3,080(6) 37,781(3)	47	–	0,31618	0,0001
10	2,865(0)	3,078 (0) 37,777(1)	39	121	0,3227	0,2212
20	2,866(8)	3,078(3) 37,776(2)	33	40	0,8777	0,8280
60	2,868(5)	3,068(6) 37,789(9)	12	16	1,4091	0,0001

В отличие от механической активации смеси Fe-SiC, механическая активация смеси Fe-B₄C приводит к частичному разложению карбида бора и сопровождается созданием избыточного давления в барабане, а также приводит к существенному намолу. Так, привес массы смеси с карбидом бора достигает 17% при длительности механической активации до 10 мин. При дальнейшем увеличении длительности обработки происходит уменьшение размера частиц абразива, о чем свидетельствует снижение интенсивности рентгеновских рефлексов фазы карбида бора (рис. 2), и, следовательно, его режущая способность уменьшается.

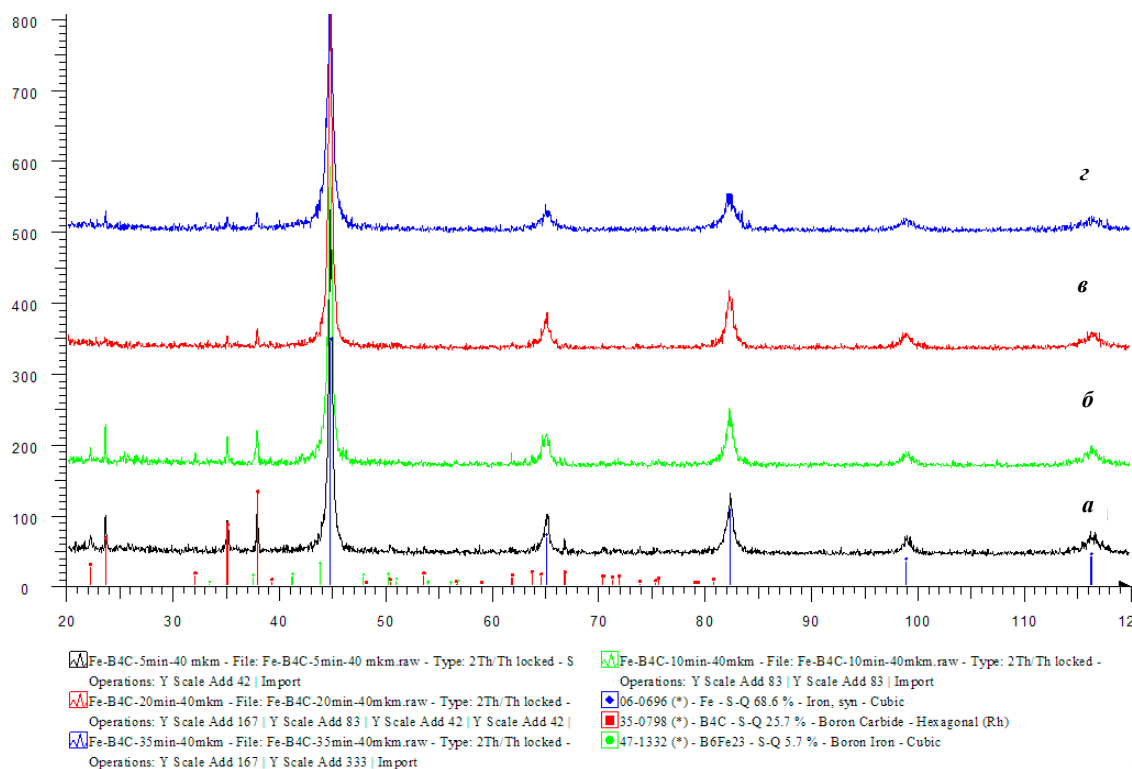


Рисунок 2 – Дифрактограммы продуктов механической активации смеси Fe-B₄C с различной длительностью обработки: 5 мин (а), 10 мин (б), 20 мин (в), 35 мин (г)

Увеличение дозы введенной механической энергии от $D = 0,9$ кДж/г до $D = 6,3$ кДж/г приводит к существенному снижению интенсивности дифракционных отражений железа и значительному их уширению, что обусловлено уменьшением размеров кристаллитов (табл. 2).

Таблица 2 – Микроструктурные параметры фаз порошковой смеси Fe-SiC при механической активации

Длительность механической активации, мин	a , с, Å		ОКР, нм		ε , %	
	Fe	B ₄ C	Fe	B ₄ C	Fe	B ₄ C
Исх	2,866	5,600 12,086	161	–	0,0027	0,0001
5	2,866	5,599 12,067	34	–	0,0001	0,1531
10	2,865	5,598 12,057	21	–	0,0616	0,2986
20	2,867	5,603 12,052	26	–	0,3315	0,9093
35	2,866	5,606 12,075	18	–	0,7229	1,5372

Следует отметить, что профиль линий железа при механической активации состава Fe-B₄C с длительностью обработки до 10 мин ($D = 1,8$ кДж/г) совпадает с профилем линий железа для случая механической активации состава Fe-SiC, что определяется закономерностью измельчения и формирования фрагментированной структуры самого железа. Различия проявляются лишь при высоких дозах механической обработки (более $D = 1,8$ кДж/г), что обусловлено, предположительно, межфазовым взаимодействием железа с элементами B₄C. На дифрактограммах регистрируется образование карбида бора нестехиометрического состава. При механической активации системы Fe-B₄C выше значений $D = 3,6$ кДж/г наблюдается появление фазы B₆Fe₂₃ (Fm-3m).

Увеличение значений параметра D механической активации, по данным рентгеноструктурного анализа, приводит к уменьшению размеров кристаллитов железа с $\langle L \rangle_{\text{Fe}} = 161$ до $\langle L \rangle_{\text{Fe}} = 18$ нм и росту уровня микродеформаций. Параметры решетки изменяется незначительно, что может быть обусловлено образованием дефектов. Более существенно изменяются параметры решетки карбида бора. Размеры кристаллитов этой фазы вплоть до значений параметра механической активации $D = 6,3$ кДж/г остаются достаточно велики, что делает невозможным определение их значений методом рентгеноструктурного анализа.

В условиях интенсивной механической активации стадийность формирования микроструктур порошковых композитов состава Fe-SiC и Fe-B₄C отличается незначительно. Так, при механической активации с дозой от $D = 0,9$ кДж/г до $D = 1,8$ кДж/г в смесях присутствуют как композиционные частицы, так и отдельные частицы железа и абразива. При этом измельчение частиц карбидов происходит значительно быстрее, чем железа (табл. 3), что обусловлено их более высокой хрупкостью. Однако измельчение карбида бора происходит в меньшей степени (от $d_{\text{ч B}_4\text{C}} = 180$ мкм до $d_{\text{ч B}_4\text{C}} = 5...25$ мкм), чем карбида кремния (от $d_{\text{ч SiC}} = 180$ мкм до $d_{\text{ч SiC}} = 1...15$ мкм).

Таблица 3 – Размеры частиц при механической активации

Доза переданной механической энергии D , кДж/длительность механической активации, мин	Размерный диапазон композиционных частиц, мкм		Размерный диапазон абразивных компонентов в композитах, мкм	
	Fe/SiC	Fe/B ₄ C	SiC	B ₄ C
0,9/5	14...250	15...400	5...20	15...45
1,8/10	8...90	10...250	1...15	5...25
3,6/20	8...110	5...85	0,6...5	0,5...15
10,8/60	1,5...43	5...80	0,3...2	0,5...10

Формируемые композиционные частицы Fe-абразив, в которых измельченные разноразмерные абразивные частицы расположены в матрице пластичного компонента железа (рис. 3), имеют широкий размерный диапазон (см. табл. 3), при этом в системе с карбидом бора формируются композиционные частицы размером в 2 раза больше, чем в системе с карбидом кремния. На ранних стадиях механической активации композиционные частицы имеют ламинарную структуру. Увеличение длительности механической активации до достижения значений $D = 3,6$ кДж/г приводит к полному расходованию железа на образование композиционных частиц и равномерному распределению твердых частиц в матрице железа с образованием глобулярной микроструктуры [8].

Таким образом, формирование структуры механокомпозитов Fe-SiC и Fe-B₄C проходит через следующие стадии:

- измельчение исходных компонентов с частичным образованием композиционных частиц в широком размерном диапазоне;
- увеличение количества композиционных частиц с уменьшением их размерных характеристик и измельчением субструктурных компонент;
- формирование композиционных частиц в узком размерном диапазоне с гомогенным распределением компонент по фазовому и размерному составу. При этом основными механизмами формирования композитов является измельчение компонентов с их деформационным перемешиванием.

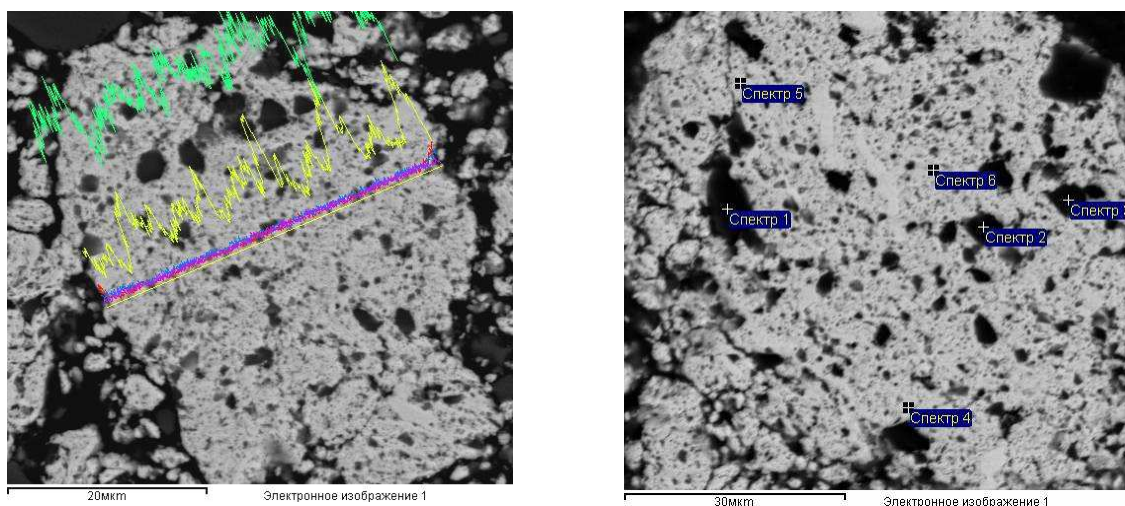


Рисунок 3 – СЭМ-изображение композиционных частиц Fe-SiC и Fe-B₄C

Как известно, структура формируемых композиционных порошков в условиях интенсивных механических воздействий может отличаться в зависимости от твердости материала и соотношения твердости исходных компонентов. При этом основными механизмами формирования композитов при механическом сплавлении считаются конкурирующие процессы разрушения частиц и их сварка. В работе J.S. Benjamin [9] показано, что механическое сплавление может успешно реализоваться, если имеется не менее 15% пластичной компоненты, поскольку хрупкие частицы не свариваются, а только разрушаются. Изучаемую порошковую смесь Fe-абразив можно классифицировать как «пластичный – хрупкий». На рисунке 4 представлена схема эволюции микроструктуры в таких системах в условиях интенсивной механической обработки, предложенная в работе [10], посвященной изучению сплавов, упрочненных оксидами.

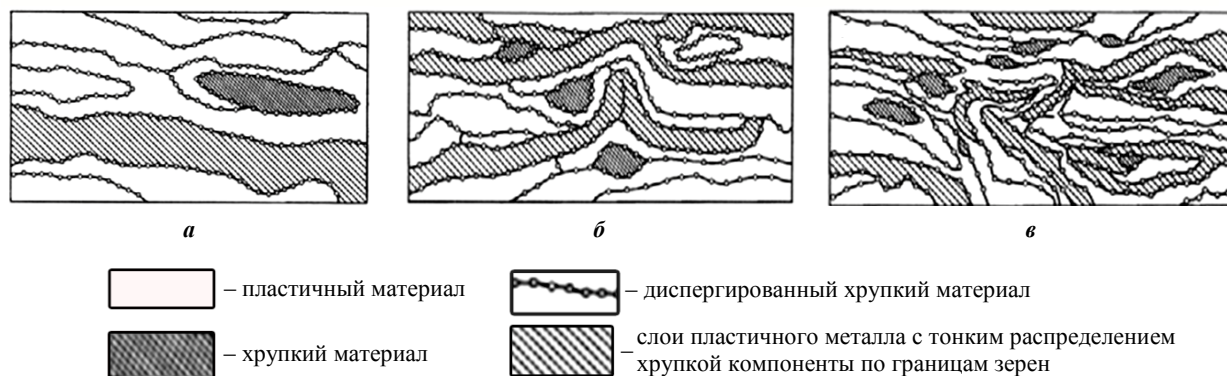


Рисунок 4 – Эволюция структуры в условиях интенсивной механической обработки комбинации «пластичный – хрупкий» (типичный случай материала, упрочненного оксидами): начальная стадия (а), промежуточная (б), завершающая (в)

Так, наиболее твердая и хрупкая фаза, диспергируется и распределяется на границах слоев пластичной составляющей (рис. 4, а). По мере дальнейшего измельчения все слои пластичного металла утончаются и «закручиваются» (рис. 4, б). Средний химический состав каждой частицы постепенно ста-

новится равным среднему химическому составу исходной смеси; оксидные частицы равномерно распределяются на границах слоев, плотность их на границах уменьшается, поскольку увеличивается площадь самих границ (рис. 4, в). Дисперсные частицы твердой фазы могут не растворяться в мягкой матрице порошки или слабо растворяться в ней.

Результаты исследований абразивной способности получаемых механокомпозитов Fe-SiC и Fe-B₄C на образцах из циркониевого сплава при длительности магнитно-абразивной обработки 5 мин приведены в таблице 4. Согласно полученным данным, наибольший весовой съем механокомпозиты Fe-SiC обеспечивают после механической активации с дозой механической энергии $D = 1,8$ кДж/г. Увеличение параметра механической активации до достижения значений $D = 3,6...10,8$ кДж/г приводит к значительному уменьшению (в 4...10 раз) размера абразивных частиц и их внедрению в объем композиционной частицы, что приводит к снижению общей абразивной способности композиционных порошков.

Таблица 4 – Результаты магнитно-абразивной обработки циркониевого сплава при использовании магнитно-абразивных порошков Fe-SiC, полученных при различных удельных дозах подведенной энергии

Образец	Доза механической энергии D , кДж/г	Усиление магнитной индукции, %	Весовой съем, мг	Размерный съем, мкм, на сторону	Шероховатость, R_a , мкм
Fe-SiC	0,9	18	27,1	4,9	0,155
Fe-B ₄ C		20	30,4	6,0	0,129
Fe-SiC	1,8	18	35,3	6,3	0,114
Fe-B ₄ C		24	34,5	6,2	0,146
Fe-SiC	3,6	18	32	5,8	0,139
Fe-B ₄ C		26	45,3	8,2	0,139
Fe-SiC	10,8	18	21,4	3,8	0,123
Fe-B ₄ C		28	41,8	7,5	0,111

Полученные механокомпозиты состава Fe-B₄C обладают большей в 1,2...1,4 раза абразивной способностью, чем механокомпозиты состава Fe-SiC, и обеспечивают большее усиление магнитной индукции. При этом с увеличением значений дозы механической энергии в исследованном диапазоне 0,9...10,8 кДж/г наблюдается постепенный рост степени усиления магнитной индукции от 20 до 28%, а максимальное значение весового съема (45 мг) достигается при значении $D = 3,6$ кДж/г.

Заключение. В условиях интенсивной механической обработки порошковых смесей состава Fe-SiC и Fe-B₄C в мельнице с энергонапряженностью $I = 3$ Вт/г формирование композитов состава Fe-абразив наблюдается уже при дозе механической энергии $D = 0,9$ кДж/г. С увеличением длительности механической активации до достижения значений $D = 10,8$ кДж/г происходит выравнивание фазового состава и интенсивное диспергирование частиц как механокомпозитов, так и абразивных включений. Размер частиц композиционных Fe-SiC снижается от $d_4 = 14...250$ мкм до $d_4 = 1,5...43$ мкм, а абразивных включений SiC – от $d_4 = 40...180$ мкм до $d_4 = 0,3...2$ мкм. Образование композита Fe-SiC в условиях механической активации происходит без существенных химических взаимодействий между компонентами, в то время как при механической активации состава Fe-B₄C происходит образование соединений B₆Fe₂₃. Основные этапы формирования микроструктуры композиционных порошков Fe-абразив включают измельчение, деформационное перемешивание и фрагментацию субмикроструктуры компонентов с образованием глобулярной микроструктуры. Изучение изменения абразивных свойств механокомпозитов Fe-абразив в зависимости от удельной дозы механической энергии механосинтеза показало, что увеличение значений D более $D = 1,8$ кДж/г приводит к снижению абразивной способности композита Fe-SiC, обусловленному уменьшением размеров твердой компоненты до $d_4 = 0,3...2$ мкм, в то время как повышение дозы переданной механической энергии до значений $D = 3,6$ кДж/г при механической активации смеси Fe-B₄C увеличивает абразивную способность синтезируемых механокомпозитов Fe-B₄C.

Работа выполнена при поддержке грантов БРФФИ № T15CO-005 и ИП № 8 в рамках совместного проекта «НАНБ (БРФФИ) – СО РАН-2015».

ЛИТЕРАТУРА

1. Механокомпозиты – прекурсоры для создания материалов с новыми свойствами / А.И. Анчаров [и др.]; отв. ред. О.И. Ломовский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. – 432 с. – (Интеграционные проекты СО РАН. Вып. 26).

2. LaRoux, K. Gillespie. Chapter 20: Magnetic-Abrasive Finishing / K. Gillespie LaRoux // From Mass Finishing Handbook. – Publisher: Industrial Press, 2006. – P. 371–401.
3. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий / Н.С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
4. Metal Surface Finishing with magnetic abrasive powder based on Iron with Ceramic Refractory Compounds (Mechanical Mixtures) / V.V. Ncpomnyashchii [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. – 2014. – Vol. 54, № 6. – P. 471–474.
5. Yodkaew, Th. Sintered Fe-Al₂O₃ and Fe-SiC Composites / Th. Yodkaew [et al.] // Journal of Metals, Materials and Minerals. – 2008. – Vol. 18, 1. – P. 57–61.
6. Iasonna, A. Power measurements during mechanical milling. An experimental way to investigate the energy transfer phenomena / A. Iasonna, M. Magini. // Acta Materialia. – 1996. – Vol. 44, № 3. – P. 1109–1117.
7. Balzar, B. Voight-function model in diffraction line-broadening analysis / B. Balzar // Microstructure Analysis from Diffraction; ed. by R.L. Snyder, H.J. Bunge, and J. Fiala. – International Union of Crystallography, 1999.
8. Davis, R.M. Mechanical alloying of brittle components: silicon and germanium / R.M. Davis, C.C. Koch // Scripta Metall. – 1987. – V. 21. – P. 305–310.
9. Benjamin, J.S. Mechanical alloying / J.S. Benjamin // Sci. Amer. – 1976. – V. 234, № 5. – P. 40–48.
10. Актуальные проблемы порошковой металлургии / под ред. О.В. Романа, В.С. Аруначалама. – М.: Металлургия, 1990. – 232 с.

Поступила 22.01.2016

FORMATION OF COMPOSITE POWDERS OF SYSTEMS Fe–SiC AND Fe–B₄C BY MECHANICAL SYNTHESIS

V. ZHORNIK, S. KOVALIOVA, N. KHOMICH,
T. GRIGORIEVA, A. DUDAN, S. GRIGORIEV

The results of investigation of structure evolution of powder composition of Fe/SiC and Fe/B₄C by mechanical activation (MA) are described. It is shown that the mechnocomposite Fe/abrasive are formed by treatment of the composition of powders Fe and abrasive in the mill with energy intensity of $I = 3$ W/g during a short time. The main stages of microstructure formation of the composite powders Fe/abrasive include crushing, deformation mixing, submicrostructure fragmentation of components and forming of globular microstructure. The alignment of the phase composition and size range of the particles of mechanocomposites and inclusions takes place during 60 minutes of the MA. The particle size of SiC is decreased more than B₄C. The formation of the composite Fe/SiC by MA during 60 minutes occurs without significant chemical interaction between the components. The formation of the phase B₆Fe₂₃ is observed during mechanical activation of Fe and B₄C.

Keywords: magnetic abrasive treatment, magnetic abrasive composites, mechanical activation, microstructure, mechano-composites, planetary ball mill.

УДК 621.793

**ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ ТЕМПЕРАТУР НАГРЕВА
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ НАПЫЛЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗА МАФ**

д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ; канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ

(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);

Д.И. ТРУСОВ

(Белорусский национальный технический университет, Минск);

А.П. ЯЛОВИК

(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк)

Демонстрируются результаты исследования, показывающие перспективы использования газа МАФ взамен пропана при нанесении металлических покрытий методом гиперзвуковой металлизации при формировании распыляющей высокотемпературной струи. Предложена методика расчета допустимой температуры нагрева цилиндрических деталей при гиперзвуковой металлизации.

Ключевые слова: *стальные покрытия, гиперзвуковая металлизация, термическое расширение, прочность сцепления, газ МАФ.*

Введение. В различных отраслях промышленности существует множество проблем, связанных с защитой изделий от воздействия высоких температур, коррозии, с повышением износостойкости элементов конструкций, ремонтом и восстановлением в течение всего срока их эксплуатации. Применение технологий формирования защитных покрытий, среди которых газотермические процессы сегодня занимают лидирующее место, является одним из кардинальных путей решения данных вопросов. Используя существующие в настоящее время оборудование, материалы и технологии газотермического напыления, возможно уменьшить или исключить полностью влияние таких процессов, как изнашивание при трении, эрозия, коррозия (в том числе высокотемпературная), абразивное изнашивание, кавитация и др. Кроме чисто защитных функций, рассматриваемые покрытия могут иметь и другое предназначение – создание термобарьера, обеспечение электроизоляционных свойств, поглощение излучения продуктов радиоактивного распада, обеспечение определенных оптических свойств, реализация селективного смачивания, создание биологически активных поверхностных свойств для различных искусственных органов и многое другое.

Одним из наиболее экономичных и эффективных способов нанесения высокоплотных металлических покрытий является гиперзвуковая металлизация [1]. Формирование покрытий данным способом (рис. 1) осуществляется путем распыления материала расплавленных в электрической дуге проволок высокоскоростной струей продуктов сгорания воздушно-пропановой смеси.



**Рисунок 1 – Установка гиперзвуковой металлизации
в процессе напыления покрытий стальными проволоками**

Главная отличительная особенность гиперзвуковой металлизации – наличие малогабаритной высокоэффективной камеры сгорания воздушно-пропановой смеси, сверхзвуковая струя которой на выходе из камеры имеет скорость до 1500 м/с при температуре 1850 °С, что позволяет частицам расплавленного металла разгоняться в потоке до 500 м/с и формировать покрытие, имеющее плотность и прочность сцепления в 2...3 раза выше, чем при традиционной электродуговой металлизации. Такие особенности процесса гиперзвуковой металлизации позволяют получать высокоплотные покрытия с пористостью 1...4% и прочностью сцепления 45...60 МПа [2].

Исследование возможности использования газа МАФ. Требования современного производства к ремонтно-восстановительным технологиям постоянно возрастают, особенно в плане повышения качества покрытий и производительности нанесения при сохранении экономической эффективности. В связи с этим были проведены исследования по повышению динамических и теплофизических параметров распыляющей струи при гиперзвуковой металлизации.

Основным критерием, определяющим качество напыляемых покрытий, является скорость потока распыляющего расплавленного металла. Чем выше скорость потока, тем выше скорость распыляемых частиц металла и, соответственно, выше плотность, твердость покрытия, а также его прочность сцепления с основой. Максимальная скорость струи газа на срезе сопла при гиперзвуковой металлизации определяется по следующей формуле [3]:

$$w_1 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_1 \left[1 - \beta_2^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (1)$$

где T – температура в камере сгорания, К; k – показатель адиабаты; R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К); $\beta_2 = \frac{P_2}{P_1}$, P_2 и P_1 – давление в среде (атмосфере) и камере сгорания соответственно.

Анализ расчетов, выполненных с использованием выражения (1) и данных о влиянии начальных параметров состояния распыляющего газа на термодинамические характеристики двухфазной струи [4], свидетельствует о том, что основными параметрами, влияющими на степень диспергирования материала проволочных электродов и скорость частиц, являются давление P_1 и температура T газа в камере сгорания металлизатора. Таким образом, наиболее рациональным путем повышения скорости распыляющей струи является увеличение ее температуры.

Для повышения температуры предложено использовать в качестве горючего газа МАФ (метилацетилен-алленовая фракция), который представляет собой смесь метилацетилена и аллена (пропадиена). Характеристики газа МАФ в сравнении с пропаном представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики газов МАФ и пропана

Газ	Тепло- содержание, ккал/м ³	Удельный вес, кг/м ³	Предельная темпера пламени, °С, в смеси с:		Термический КПД относительно		Отношение кислорода к горючему газу при нормальном пламени		Теплота разложения молекул, ккал/кг
			кислородом	воздухом	стали	меди	м ³ /м ³	м ³ /10000 ккал	
Пропан	22 160	2,01	2 500	1 925	0,46	0,57	3,5	1,68	–560
МАФ	21 200	1,70	3 020	2 165	0,54	0,63	2,2	1,04	+290

Как видно из таблицы 1, газ МАФ имеет температуру горения с воздухом на 240 градусов выше, чем у пропана. В то же время для горения газа МАФ необходимо на 30% меньше кислорода, чем при горении пропана, что способствует снижению окисления распыляемого металла.

Для проведения исследования был разработан аппарат гиперзвуковой металлизации АДМ-12, использующий МАФ в качестве горючего газа для создания распыляющей струи.

Опытные образцы покрытий напыляли проволокой из стали 30ХГСА. В качестве подложки использовали пластинки, изготовленные из стали 20 с размерами 20×30×4 мм. Толщина напыляемого покрытия составляла 1,7...2,0 мм. Давление воздуха в процессе напыления – 0,4 МПа; давление МАФ – 0,5 МПа; величина тока – 210 А; дистанция напыления – 100...120 мм. Для сравнения на этих режимах напыляли образцы с использованием пропана в качестве горючего газа.

ДюрOMETрические исследования образцов обнаружили, что твердость покрытий при использовании пропана составляет 280...300 HV, твердость покрытий с использованием газа МАФ – 350...385 HV.

Исследования плотности покрытий с использованием системы Stereo Scan показали, что усредненные значения пористости при напылении с пропаном составляют 2,9%, а при напылении с МАФ – 2,2%. В то же время химический анализ полученных покрытий указывает на то, что при использовании газа МАФ в проволоочном материале на 15...35% меньше выгорает углерод, марганец и хром (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты химического анализа покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации при использовании различных горючих газов, образующих распыляющей факел

Горючий газ	Марка распыляемой стали	Содержание элементов в покрытии, %						
		C	Mn	Cr	Ni	Si	Fe	другие примеси
Пропан	30ХГСА	0,07	0,4	0,7	0,1	0,8	основа	0,3
МАФ	30ХГСА	0,11	0,5	0,8	0,1	0,8	основа	0,3

На основании полученных данных можно предположить, что благодаря увеличению плотности, снижению количества кислорода в продуктах сгорания, а также более мелкому распылу присадочного материала происходит возрастание твердости покрытий.

Расчет допустимой температуры разогрева напыляемой цилиндрической детали. Несмотря на высокие технические показатели технологии гиперзвуковой металлизации, в процессе напыления при несоблюдении необходимых режимов может произойти отслоение наносимых покрытий. Наиболее часто данная проблема возникает при напылении толстослойных стальных покрытий на тела вращения. Это связано с тем, что в процессе напыления происходит нагрев напыляемой детали, приводящий к ее термическому расширению. В то же время из-за разницы термического расширения материала детали и покрытия возникают напряжения, способствующие растрескиванию и отрыву покрытия от поверхности детали. Одна из основных причин данных дефектов – недостаточная прочность сцепления покрытия с основой. Учитывая этот фактор, возникла необходимость в аналитическом определении допустимой температуры разогрева детали в процессе ее напыления, исключающей отслоение покрытия.

В приведенном ниже расчете рассматривали напыляемую деталь с покрытием как двухслойный цилиндр (рис. 2).

В рассматриваемом покрытии происходит термическое расширение с увеличением диаметра внутреннего цилиндра на величину Δ . При этом внутренний цилиндр давит на наружный с силой p , которая определяется по формуле (2) [5]:

$$p = \frac{\frac{\Delta}{2r_2}}{\frac{1}{E_1} \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \mu_2 \right)}, \quad (2)$$

где E_1 , E_2 , μ_1 , μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуансона материалов внутреннего и наружного цилиндров соответственно; r_1 и r_2 – внутренний и наружный радиусы детали, мм; r_3 – наружный радиус покрытия, мм; Δ – величина линейного расширения на границе «деталь – покрытие», мм.

Величина линейного расширения на границе «деталь – покрытие» определяется как

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2, \quad (3)$$

где Δ_1 и Δ_2 – температурное расширение материала детали и материала покрытия соответственно.

Температурное расширение материала детали и покрытия рассчитывается по формулам (4) и (5) [6]:

$$\Delta_1 = d_{o1}(1 + \alpha_1 \Delta T), \quad (4)$$

$$\Delta_2 = d_{o2}(1 + \alpha_2 \Delta T), \quad (5)$$

где d_{o1} – наружный диаметр детали; d_{o2} – внутренний диаметр покрытия, мм; α_1 , α_2 – коэффициент линейного теплового расширения материала детали и материала покрытия соответственно, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\Delta T = T_2 - T_1$ (T_2 – температура нагрева детали с покрытием в процессе напыления; T_1 – температура окружающей среды).

Зная силу, с которой подложка давит на покрытие, можно определить напряжения, стремящиеся оторвать покрытие от подложки [5]:

$$\sigma = \frac{p r_3^2}{r_1^2 - r_3^2} + \frac{p r_1^2 r_3^2}{r^2 (r_1^2 - r_3^2)}. \quad (6)$$

Таким образом, зная температуру нагрева напыляемой детали, можно определить напряжения отрыва покрытия от основы.

Экспериментальными исследованиями установлено, что гиперзвуковая металлизация позволяет нанести металлические покрытия с прочностью сцепления 45...50 МПа. Эти данные и результаты полученных расчетов позволяют определить допустимую температуру нагрева цилиндрической детали (рис. 2) в процессе напыления покрытия.

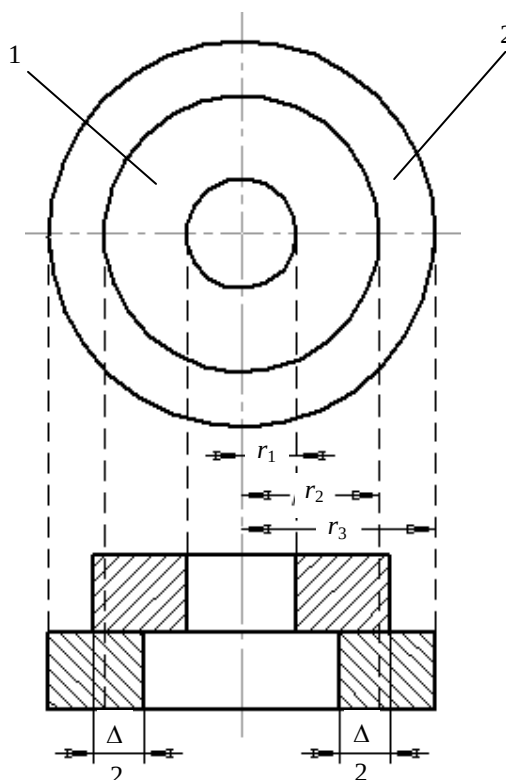


Рисунок 2 – Схема взаимодействия детали 1 и напыляемого слоя 2 в результате термического расширения

Анализируя практические результаты напыления металлических покрытий методом гиперзвуковой металлизации, в формулу (2) введен поправочный коэффициент k :

$$p = \frac{k \frac{\Delta}{2r_2}}{\frac{1}{E_1} \left(\frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{1}{E_2} \left(\frac{r_3^2 + r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} - \mu_2 \right)}, \quad (7)$$

при этом коэффициент k выбирается в диапазоне значений от 0,65 до 0,9.

Расчет допустимой температуры разогрева проверялся при восстановлении пиноли задней бабки станка 1A670 путем напыления покрытия из проволоки 30ХГСА методом гиперзвуковой металлизации, показанной на рисунке 3.

Диаметр пиноли составлял 360 мм; длина – 1,7 м; толщина наносимого покрытия – 3 мм.

В конце процесса напыления максимальная температура детали достигала 125 °С, в результате чего произошло отслоение покрытия от детали.



Рисунок 3 – Процесс напыления покрытия методом гиперзвуковой металлизации на пиноль задней бабки станка 1А670

При повторном напылении в соответствии с расчетами по указанным выше формулам температуру нагрева детали поддерживали не выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом отслоения покрытия не происходило, о чем свидетельствуют данные рисунка 4.

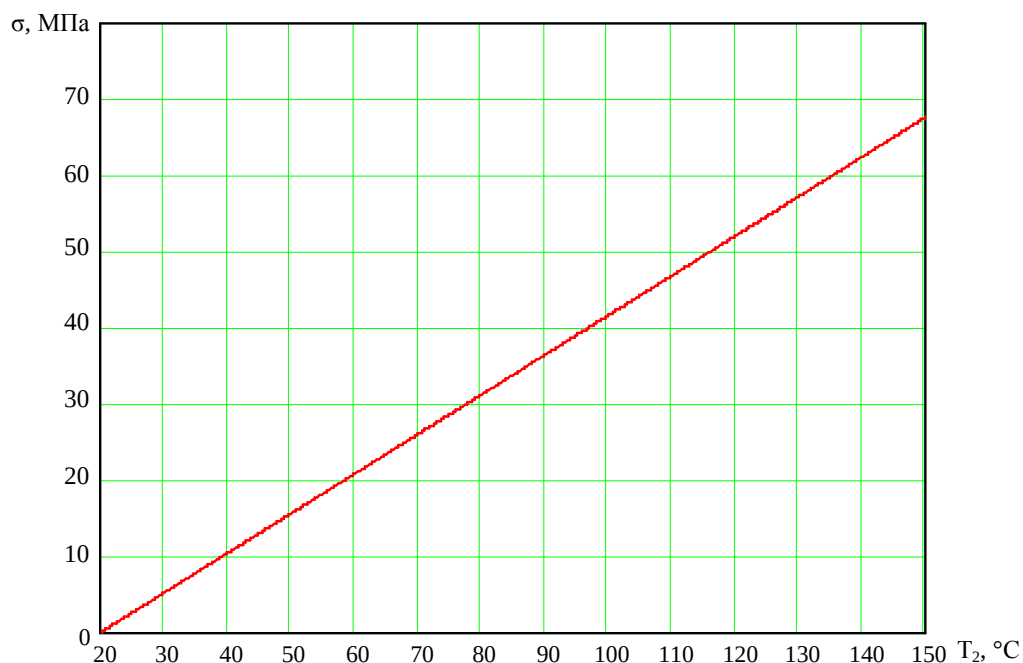


Рисунок 4 – Результаты расчета величины напряжений отрыва покрытия (σ) в зависимости от температуры нагрева детали (T_2) в процесс напыления покрытия методом гиперзвуковой металлизации на пиноль задней бабки станка 1А670

Закключение. Проведенные эксперименты показали, что использование МАФ в качестве горючего газа взамен пропана при формировании распыляющей высокотемпературной струи позволяет повысить твердость и плотность покрытий и является перспективным направлением в дальнейшем совершенствовании процесса напыления методом гиперзвуковой металлизации.

Предложена методика расчета допустимой температуры нагрева цилиндрических деталей при гиперзвуковой металлизации. Использование данной методики позволяет предотвратить отрыв покрытия в результате термического расширения детали при ее нагреве в процессе напыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, М.А. Особенности и применение гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский // Белорусская инновационная неделя «Состояние и перспективы совместных белорусско-польских исследований в области упрочняющих и биотехнологий»: науч.-практ. семинар. – 2011. – 16–17 ноября. – Минск, 2011.
2. Витязь, П.А. Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко // Ремонт, восстановление, модернизация (Рос. Федерация). – 2010. – № 10. – С. 2–5.
3. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники / В.И. Ляшков. – М.: Машиностроение, 2008. – 319 с.
4. Белоцерковский, М.А. Методы и оборудование для формирования высокоэнергетических двухфазных потоков / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // Физика плазмы и плазменные технологии (ФППТ-2): материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 15–19 сент. 1997 г.: в 4 т. / редкол.: В.С. Бураков (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 1997. – Т. 4. – С. 670–673.
5. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 590 с.
6. Миролюбов, И.Н. Пособие к решению задач по сопротивлению материалов / И.Н. Миролюбов, И.Н. Миролюбов, С.А. Енгальчев, Н.Д. Сергиевский. – М.: Высш. школа, 1967. – 483 с.

Поступила 29.01.2016

ASSESSMENT OF ALLOWED HEATING TEMPERATURES
OF CYLINDRICAL PARTS DURING DEPOSITION OF THE METAL COATING
BY HYPERSONIC METALLIZATION USING MAF GAS

M. BELOTSERKOVSKY, A. SOSNOVSKY, D. TRUSSOV A. YALOVIK

The results of studies showing the prospects of using MFA gas instead of propane for applying metallic coatings by Hypersonic metallization in the formation of high-temperature spray jet are shown. The method of calculating the permissible temperature of heating cylindrical parts at hypersonic metallization is suggested.

Keywords: *steel coating, hypersonic metallization, thermal expansion, adhesion strength, MFA gas.*

УДК 535.016

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

**И.А. ГРАБАРЬ; канд. техн. наук, доц. Н.В. НАСОНОВА;
канд. техн. наук, доц. Т.А. ПУЛКО; д-р техн. наук, проф. Л.М. ЛЫНЬКОВ**
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Рассматриваются оптические характеристики композиционных влагосодержащих материалов. Демонстрируются полученные в ходе исследования коэффициент спектральной яркости и степень поляризации – оптические характеристики искусственных влагосодержащих материалов в диапазоне длин волн 440...940 нм. Представлен анализ зависимостей полученных результатов от размера частиц, цвета и структуры поверхности образцов. Обнаружена корреляция оптических характеристик исследованных материалов с природными фонами (снег, песок, водная гладь, растительность).

Ключевые слова: композиционные влагосодержащие материалы, коэффициент спектральной яркости, степень поляризации, оптический контраст.

Все природные и искусственно созданные объекты при наблюдении в видимом диапазоне воспринимаются раздельно благодаря их яркостным различиям. Яркость объекта зависит от освещенности, отражательной способности, поглощения отражательного излучения промежуточной средой. К основным показателям, характеризующим яркость объектов, относится коэффициент спектральной яркости (КСЯ). Данная величина характеризует пространственное распределение спектральной яркости, отражающей поверхности, используется для объектов с тоновыми или цветовыми различиями.

Коэффициент спектральной яркости вычисляется по следующей формуле:

$$КСЯ = B/B_o, \quad (1)$$

где B – спектральная яркость объекта; B_o – спектральная яркость идеально рассеивающей поверхности в одинаковых условиях освещения и наблюдения.

Объекты могут быть выделены из фона в значительной степени благодаря различиям в их яркости, которые оцениваются яркостным (пограничным) контрастом K . Он равен отношению разности яркостей (коэффициентов яркостей) смежных объектов к большей из них:

$$K = (B_1 - B_2) / B_1. \quad (2)$$

Яркость, или цвет, объекта определяется характером отраженного лучистого потока и спектральной отражательной способностью, зависящей от структуры поверхности объекта. Существенно влияют на восприятие цвета характер освещения, его спектральный состав и мощность. При смене источника освещения может произойти изменение светлоты, насыщенности и тона цвета.

Исследования проводились в видимом диапазоне длин волн (400...1050 нм), в котором выделяют семь поддиапазонов: красный (770...650 нм); оранжевый (650...585 нм); желтый (585...575 нм); зеленый (575...510 нм); голубой (510...480 нм); синий (480...440 нм); фиолетовый (440...390 нм).

Оптическое излучение обладает высокой энергией. Энергия оптического излучения, падая на какой-либо объект, частично отражается от поверхности объекта, частично им поглощается и частично пропускается. Относительные значения потоков в долях от полного, упавшего на поверхность объекта, соответственно характеризуют коэффициенты отражения (r), поглощения (a) и пропускания (g):

$$r + a + g = 1. \quad (3)$$

Эти коэффициенты служат важными оптическими показателями различных тел, определяющими их оптические свойства.

Шероховатость поверхности увеличивает эффекты многократного рассеяния оптического излучения, что приводит к уменьшению отражательных характеристик и увеличению коэффициента излучения. Увеличение содержания частиц меньших размеров на поверхности приводит к увеличению коэффициента спектральной яркости, обусловленному увеличением многократного внутреннего рассеяния света; уменьшение шероховатости поверхности обуславливает увеличение этого коэффициента. Структура поверхности объекта влияет на изменение яркости с изменением угла наблюдения.

Цель данной работы – получение искусственных влагосодержащих материалов, схожих по оптическим характеристикам с природными фонами; исследование и анализ их яркостных характеристик.

Измерение оптических характеристик влагосодержащих композиционных материалов. Изготовленные образцы представляли собой влагосодержащие композиционные материалы в виде прямоугольных пластин размером 60×70 мм, отличающиеся природой, размерностью и структурой элементов поверхности, а также их влагосодержанием (табл. 1).

Таблица 1 – Описание исследуемых образцов

Наименование образцов	Вид матрицы Материал и характерные размеры	Влагосодержание, %
Влагосодержащее трикотажное полотно (ТП)	Синтетическое волокнистое вязаное полотно, диаметр волокон около 25 мкм	60,0
Влагосодержащее целлюлозное нетканое полотно (ЦП)	Натуральное волокнистое нетканое полотно, диаметр волокон около 25 мкм	60,0
Гидрогель (г/г ₁)	Гель на основе анионного полиакриламида и воды	76,0
Гидрогель (г/г ₂)	Гель на основе анионного полиакриламида и воды	36,0
Смесь гидрогеля с силикагелем (с/г + г/г)	Полимерное соединение порошка силикагеля с гидрогелем	25,0
Силикагель в гранулах, (с/г)	Кремниевые пористые частицы сферической формы, размером 4 мм	15,0
Хна	Сферические частицы порошка растительного происхождения (размер фракций 0,1...0,5 мм) в клее	1,5
Лавровый лист (Лл ₁)	Пластинчатые частицы фракциями растительного происхождения размером 1...3 мм в клее	1,5
Лавровый лист (Лл ₂)	Пластинчатые частицы фракциями растительного происхождения размером 0,5...1,5 мм в клее	1,5

Исследования оптических характеристик проводились в видимом диапазоне (440...940 нм) с помощью гониометрической установки и спектрорадиометра ПСР-02, имеющего разрешение не хуже 2 нм с поляризационной насадкой, позволяющей регистрировать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) образцов при различных положениях оси поляроида.

Спектрорадиометр ПСР-02 предназначен для проведения измерения в лабораторных и полевых условиях спектральной плотности энергетической яркости, а также поляризационных характеристик отраженного растительными элементами или другими объектами излучения в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм [2].

В результате обработки зарегистрированных на гониометрической установке спектров отражения в диапазоне 0,44...1,05 мкм были получены оптические характеристики исследуемых образцов при углах падения света 0, 45, 90° и углах наблюдения 0, 25, 45 и 65°.

Для обработки спектров отражения и вычисления КСЯ исследуемых объектов были получены спектры отражения для материала с равномерной индикатрисой рассеяния, в качестве которой использовался диффузный отражатель. В качестве отражателя использовалась пластина молочного стекла МС-20 толщиной 10 мм. Для анализа спектров отражения и вычисления КСЯ исследуемых материалов были получены спектры отражения для эталонного образца, выполненного на основе молочного стекла МС-20 с равномерной индикатрисой рассеяния при условиях измерений, аналогичных условиям для исследуемых образцов.

Коэффициент спектральной яркости КСЯ вычислялся как отношение СПЭЯ исследуемого материала к СПЭЯ молочного стекла МС-20. Величины СПЭЯ-спектров отражения образцов $L_{об}$ нормировались на величину СПЭЯ-спектра, отраженного от МС-20 излучения $L_{МС}$ для каждой длины волны, получая коэффициент спектральной яркости КСЯ исследуемых образцов $R_{об}$:

$$R_{об} = \frac{L_{об}}{L_{МС}}. \quad (4)$$

Степень поляризации рассчитывалась для каждой длины волны λ следующим образом:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{L}, \quad (5)$$

где Q , U , L – параметры Стокса, определяемые по следующим формулам:

$$L = I_0 + I_{90}; \quad (6)$$

$$Q = I_{90} - I_0; \quad (7)$$

$$U = I_{0+90} - 2I_{45}. \quad (8)$$

Спектральная зависимость степени поляризации P отраженного от объектов излучения корректировалась вычитанием известной поляризующей способности P_{PSR} спектрорадиометра ПСР-02 [3]:

$$P = P_{об} - P_{PSR} \quad (9)$$

Поляризующая способность ПСР-02 определялась с помощью диффузного излучателя – неполной фотометрической сферы, являющейся источником деполаризованного излучения в широком спектральном диапазоне вследствие многократных переотражений внутри сферы.

Результаты и обсуждение. На основе полученных экспериментальных и расчетных данных построены зависимости коэффициента спектральной яркости и степени поляризации от длины волны в видимом диапазоне длин волн для влагосодержащих композиционных материалов, изготовленных из волокнистых и порошкообразных материалов (рис. 1, а–е).

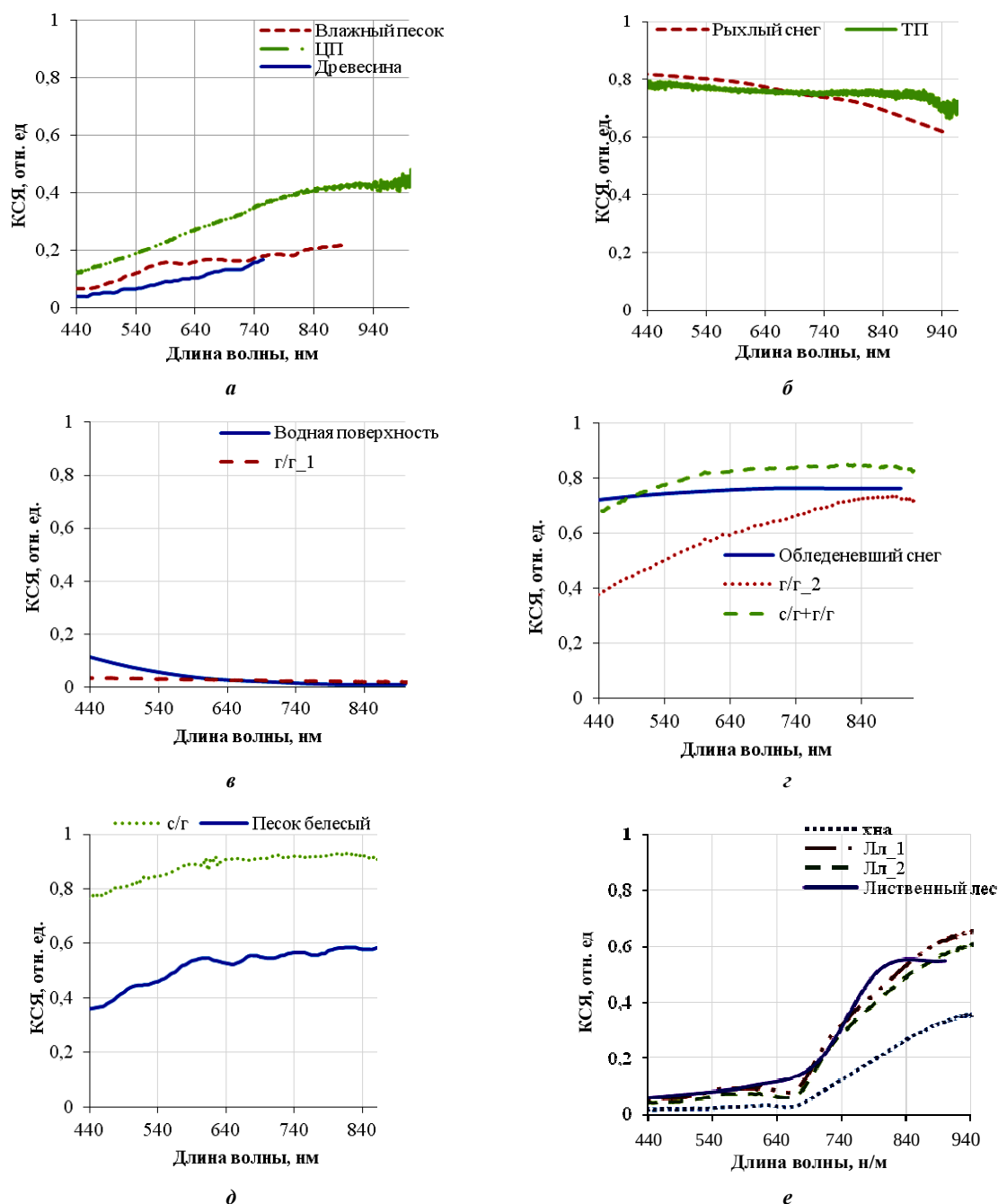


Рисунок 1 – Сравнительные характеристики коэффициента спектральной яркости от длины волны в видимом диапазоне при угле наблюдения 0°

Анализ данных показал, что оптические характеристики полученных влагосодержащих образцов коррелируют с оптическими характеристиками природных фонов [5].

Влагосодержащее целлюлозное нетканое полотно по своим оптическим свойствам относится к селективно-поглощающим и рассеивающим средам благодаря своему физико-химическому составу и структуре поверхности. Характер и уровень *КСЯ* целлюлозного нетканого полотна схож с характеристикой желтого песка, контраст относительно песка составляет 0,2...0,49. Кроме того, сравнение характеристики влагосодержащего целлюлозного полотна с *КСЯ* древесины показало сходный характер зависимости, что может быть обусловлено высоким содержанием целлюлозы в древесине.

По структуре материала в видимом диапазоне влагосодержащее трикотажное полотно можно отнести к ортотропным поверхностям, поскольку волокна исследуемого трикотажного полотна обладают переплетением с большим числом изгибов нитей, которые отражают световой поток рассеянно. Диффузионное рассеивание светового потока обусловлено неравномерностью строения волокна, которое имеет структурные элементы различной плотности, часто неравномерно и неплотно расположенные по толщине волокна. Отражение света влажным трикотажем определяется процессами поглощения света водой, отражением и рассеянием света от поверхности волокон, а также рассеянием внутри пор и на неоднородностях, сформированных волокнами.

Основными факторами, влияющими на *КСЯ* влагосодержащих волокнистых материалов, являются влажность, пористость и плотность волокон. Влагосодержащее трикотажное полотно имеет характеристику *КСЯ*, равномерную во всем диапазоне длин волн. Контраст белого влагосодержащего трикотажа по отношению к рыхлому снегу –0,09...0,1.

Водные поверхности характеризуются самыми низкими значениями *КСЯ* и его монотонным уменьшением, поскольку длинноволновое излучение сильнее поглощается водой. Согласно полученным результатам *КСЯ* гидрогеля с влагосодержанием 76% можно отнести к зеркальным поверхностям. Контраст гидрогеля по отношению к чистому льду или воде составляет –0,78...0,44. При снижении влагосодержания гидрогеля до 36% его контраст по отношению к обледеневшему снегу равен –0,3...–0,042, *КСЯ* гидрогеля увеличивается за счет уменьшения поглощения света водой и появления большого числа твердотельных элементов желтого цвета. При смешивании гидрогеля с порошком силикагеля количество элементов желтого цвета еще больше увеличивается, что выражается в увеличении *КСЯ*. Контраст смеси силикагеля и гидрогеля по отношению к обледеневшему снегу составляет –0,081...0,091, но характеристика снега более равномерная, а на *КСЯ* гидрогеля 36% влияет желтый цвет полимера.

Композиционные материалы, изготовленные из порошков растительного происхождения, относятся к смешанным с рассеянно-направленным отражением, у которых элементы поверхности ориентированы большей частью одинаково.

Спектральная яркость растений меняется с их возрастом: она выше у молодых растений и ниже у находящихся в стадии полной зрелости. Основные факторы, влияющие на полученные оптические характеристики хны и лаврового листа, – присутствие хлорофилла и растительных пигментов, структура поверхности и элементов, а также геометрия распределения листьев и отражательная способность связующего. Оптический контраст по отношению к листовенному лесу лаврового листа с крупными частицами составляет 0,12...0,11, лаврового листа с мелкими частицами 4...–0,13...0,03, хны – –0,618...–0,4.

Контраст силикагеля по отношению к речному (белесому) песку составляет 0,605...0,34. Спектральная яркость силикагеля зависит от входящих в его состав минералов и элементов, а также размера гранул и влагосодержания.

При рассеянии света структура поверхности также может влиять на поляризацию электромагнитных волн. Спектральная зависимость степени линейной поляризации отраженного излучения является немаловажным параметром для исследования оптических характеристик объектов.

Полученные данные степени поляризации излучения исследуемых объектов показали, что целлюлозное нетканое полотно обладает слабой анизотропией в направлении проката полотна, за счет чего отраженное излучение имеет выше степень поляризации, чем в случае трикотажного полотна. Разница в значениях степени поляризации излучения для образцов из хны и лаврового листа незначительна, что обусловлено хаотичным распределением без преимущественного направления элементов растительности по поверхности. Сравнивая характеристики поляризации отраженного излучения для образцов на основе гидрогеля и силикагеля, можно сделать вывод, что гидрогель с влагосодержанием 76% по массе имеет степень поляризации отраженного излучения выше по сравнению с остальными образцами, поскольку он обладает гладкой прозрачной поверхностью и большим содержанием воды.

Заключение. В результате проведенного исследования разработаны искусственные влагосодержащие материалы и исследованы их оптические характеристики (коэффициент спектральной яркости и степень поляризации) в диапазоне длин волн 440...840 нм.

Показано, что в зависимости от размера и формы частиц, физико-химического состава, структуры поверхности и цвета могут быть получены материалы, оптические контрасты которых по отношению к природным фонам составляют $-0,1 \dots 0,64$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шашлов, А.Б. Основы светотехники: учеб. для вузов / А.Б. Шашлов, Р.М. Уварова, А.В. Чуркин. – М.: МГУП, 2002. – 280 с.
2. Полевой спектрорадиометр ПСР-02 // Сайт отдела аэрокосмических исследований НИИПФП им. А.Н. Севченко Белгосуниверситета. 2013. – Режим доступа: <http://remsens.by/development/spectrometers/psr02>. – Дата обращения: 19.09.2015.
3. Полевой спектрорадиометр ПСР-02 на область 0,35–2,5 мкм / Б.И. Беляев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 2 – С. 127–132.
4. Pulko, T. Solution composition influence on the optical characteristics of liquid-containing composite materials / T. Pulko, P. Safrankov, N. Nasonova // International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences»: In two volumes Vol. II (Section 7, Poster Section) (Minsk, Belarus, June 15–19, 2010). – Minsk: “Kovcheg”, 2010. – P. 80–85.
5. GIS-Lab: Спектры отражения природных объектов – база данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/projects/spectra>. – Дата доступа: 21.01.2015.

Поступила 24.09.2015

RESEARCH OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS INCLUDING WATER SOLUTIONS

I. GRABAR, N. NASONOVA, T. PULKO, L. LYNKOU

The optical characteristics (spectral brightness coefficient and the degree of polarization) artificial materials including water solutions were obtained in the wavelength range of 440...940 nm. The analysis of dependences of the got results is conducted from the particle size, color and surface structure of the samples. The correlation between the optical characteristics of the investigated materials with natural backgrounds (snow, sand, water surface, vegetation) is found out.

Keywords: *moisture-containing composite materials, coefficient of spectral brightness, degree of polarization, optical contrast.*

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОХРАНА ТРУДА

УДК 543.08

МОДИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА КОМПОНЕНТОВ В РАСТВОРЕ

д-р хим. наук М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ

(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск);
канд. техн. наук, доц. М.О. ШЕВЧУК; канд. техн. наук, доц. В.Л. ФЛЕЙШЕР

(Белорусский государственный технологический университет, Минск);

канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются особенности проведения анализа спектров органических соединений методом Каца и Уоллеса и его последующих модификаций. Показаны возможности возникновения ошибок при использовании данного подхода. Предложена модификация метода Каца и Уоллеса, для чего матрицу оптических плотностей $\mathbf{D}$ необходимо перевести в матрицу вида $\mathbf{DD}^T$ и либо получить набор собственных чисел для каждого параллельного определения, либо получить набор матриц путем преобразования матрицы $\mathbf{DD}^T$ в верхнетреугольную. В первом случае определяют число собственных чисел, отличных от нуля. Во втором варианте определяют число диагональных элементов, отличных от нуля. Приведены и другие рекомендации, которые позволяют повысить точность определения, например, контроль количества компонентов в растворе путем разложения спектра поглощения на составляющие. Приведен пример выполнения анализа для раствора метилового красного.

Ключевые слова: спектр органических соединений, метод Каца и Уоллеса, контроль количества компонентов, модифицированная методика, собственные числа, диагональные элементы.

Введение. Возможность использования свойства аддитивности для определения числа компонентов в смеси давно известна в физике и химии. В частности, такие методы используются и при определении числа компонентов при помощи спектрофотометрии [1]. При условии выполнения закона Ламберта – Бугера – Бера светопоглощение раствора равно сумме оптических плотностей отдельных компонентов. Для различных длин волн можно записать матричное выражение

$$\mathbf{D} = \mathbf{E}\mathbf{C},$$

где $\mathbf{E}$ – матрица коэффициентов экстинкции; $\mathbf{C}$ – матрица концентраций; $\mathbf{D}$ – матрица оптических плотностей, элементы D_{ij} которой для i -го раствора и j -й длины волны вычисляются по общеизвестной формуле Ламберта – Бугера – Бера.

$$D_i = c_1\varepsilon_1 + c_2\varepsilon_2 + \dots + c_n\varepsilon_n.$$

D_{11}	D_{12}	$\dots$	D_{1n}
D_{21}	D_{22}	$\dots$	D_{2n}
$\dots$	$\dots$	D_{ij}	$\dots$
D_{m1}	D_{m2}	$\dots$	D_{mn}

Идея определения числа компонентов с использованием матрицы оптических плотностей состоит из двух частей – в первой определяют ранг матрицы, который равен числу линейно независимых строк, во второй уточняют, какая из строк матрицы статистически незначимо отличается от нуля. На наш взгляд, именно это вторая часть определения до сих пор определяется крайне некорректно и вызывает ряд вопросов.

Как следует из [1], первая работа, где определялся ранг матрицы, принадлежит Кацу и Уоллесу, которые приводили матрицу оптических плотностей к ступенчатому виду и сравнивали ее с одновременно преобразованной матрицей статистических погрешностей эксперимента. К основному недостатку такого подхода относится использование равноточной матрицы ошибок. Хрестоматийным является утверждение, что точность определения оптической плотности зависит от ее величины, а также тот факт, что наибольшая точность получается в интервале $D = 0,3 \dots 0,8$. При выходе из этих пределов, особенно в

области меньше 0,2, ошибка определения увеличивается в 1,5...3 раза. Ошибка определения также зависит от кривизны кривой $D - \lambda$, иногда и от длины волны.

По Кацу и Уоллесу, перевод матрицы к ступенчатому виду проводится путем перестановки столбцов и строк. Рассмотрим на примере, к чему может привести данный прием. Ниже, с левой стороны, приведены три одинаковые матрицы размером 3×3 , которые отличаются друг от друга только тем, что в них переставлены строки и столбцы. Известно, что такая перестановка не влияет на ранг. С правой стороны приведено преобразование этих матрицы к ступенчатому виду. Достаточно сравнить элементы преобразованных матриц, как становится очевидным, что некоторые элементы (i,j) этих преобразованных матриц отличаются друг от друга на порядок, в то время как матрица ошибок всегда для всех трех матриц одна и та же. Следовательно, вероятность получить три одинаковых результата при сравнении матрицы оптических плотностей и матрицы ошибок крайне мала.

0,5	0,6	0,1	0,5	0,6	0,2
0,6	0,9	0,15	0	0,18	-0,09
0,7	1,0	0,050	0	0	-0,15
0,7	1,0	0,05	0,7	1,0	0,05
0,6	0,9	0,15	0	0,428	0,107
0,5	0,6	0,2	0	0	0,4499
1,0	0,7	0,05	1,0	0,7	0,05
0,9	0,6	0,15	0	-0,03	0,105
0,6	0,5	0,2	0	0	0,45

Вызывает интерес результат изучения реакции гафния (4) с хлораниловой кислотой в 3М хлорной кислоте в области 260...350 нм, приведенный в [2]. Было измерено светопоглощение двенадцати растворов при двадцати одной длине волны. При ошибке 0,045...0,050 ранг матрицы (число компонентов) составлял два, при ошибке 0,015...0,045 эта величина уже была равна трем, а при ошибке 0,005...0,015 и менее 0,005 – соответственно четырем и пяти.

Примеры иллюстрируют тот факт, что основной проблемой определения числа компонентов в растворе этим методом является учет ошибки определения оптической плотности.

Существующие модификации метода оценки ранга матрицы оптических плотностей по-прежнему продолжают нести в себе описанные выше недостатки. Так, например Мак-Муллен [1] с соавторами предложил не пользоваться матрицами погрешности, считая, что все ошибки равнозначны. Для каждой строки преобразованной матрицы вычисляется ее среднее суммы квадратичных значений оптических плотностей, из которых затем извлекают квадратный корень. Полученное значение сравнивают со среднеквадратичной погрешностью при помощи статистического критерия, например, Стьюдента. При этом данный способ расчета ничем не обоснован.

В качестве примера использования этого метода рассмотрим определение числа компонентов [1] в спектрах раствора амида салициловой кислоты, полученного при различных pH. Приводим три столбца после нашего расчета по Мак-Муллену, расположив предварительно строки матрицы произвольным образом.

1 вариант	2 вариант	3 вариант
0,83292	0,396378	0,83292
0,365522	0,224016	1,901874
0,002835	0,019837	0,045971
0,001628	0,013385	0,004023

Очевидно, что для ошибки 0,004 и в зависимости от того, как мы расположили строки и столбцы матрицы, число компонентов в растворе колеблется от 2 до 4.

Известно, что ранг матрицы DD^T равен рангу матрицы D , поэтому для формального определения ранга матрицы можно воспользоваться определением ненулевых собственных значений такой матрицы. Однако все методы, основанные на таком подходе, также не имеют четкого обоснования. Во-первых, как и ранее, предлагается использовать равнозначную матрицу ошибок. Во-вторых, метод статистического обоснования не до конца ясен. Так, например, Кенкар [1] предложил следующий критерий останова.

Необходимо вычислить $\mathbf{M} = (\mathbf{D}\mathbf{D}^T)/g$ (g – количество растворов или количество длин волн в зависимости от структуры матрицы $\mathbf{D}$), а затем величину S_k по формуле

$$S_k = ((tr\mathbf{M} - \sum \lambda_i) / (m - k))^{0.5},$$

где $tr\mathbf{M}$ – след матрицы $\mathbf{M}$; λ_i – собственное число; m – число длин волн; k – количество собственных чисел, равное числу строк или столбцов квадратной матрицы $\mathbf{M}$.

Далее процедура предполагает последовательно увеличивать число собственных чисел k в данной формуле и определять величину S_k , сравнивая ее с ошибкой определения оптической плотности. Статистического объяснения в пользу такого приема не приводится. Отсутствует также и рекомендация в случае получения собственного числа в комплексной форме.

Таким образом, недостатки данных методов определения числа компонентов в растворе – использование постоянной ошибки для всех длин волн и отсутствие четкого обоснования приемов расчета.

В связи с этим предлагаем *собственный метод расчета числа компонентов в растворе*.

В настоящее время не существует никаких проблем с возможностью получения спектра, снятого 3...5 раз. Поэтому ошибка определения будет разная для каждого раствора и для каждой длины волны. Полученные матрицы оптических плотностей $\mathbf{D}$ необходимо перевести в матрицу вида $\mathbf{D}\mathbf{D}^T$. Сложности такого перевода отсутствуют. Во-первых, в электронных таблицах Excel существует простая опция преобразования матрицы $\mathbf{D}$ в $\mathbf{D}^T$ – вкладка **Вставить-Транспонировать**, а также опция перемножения двух матриц – **МУМНОЖ**. Во-вторых, можно воспользоваться онлайн сервисами, например, <http://matrixreshish.ru/rank.php> и <http://www.mathforyou.net/>. Эти серверы имеют все необходимые вкладки для решения такой задачи. Затем можно воспользоваться двумя хорошо известными преобразованиями. Либо получить набор собственных чисел для каждого параллельного определения, либо получить набор матриц путем преобразования матрицы $\mathbf{D}\mathbf{D}^T$ в верхнетреугольную. Набор таких опций имеется на сервере <http://www.mathforyou.net/>. Эту же процедуру можно осуществить и в пакете Mathcard. Тестирование полученных результатов показывает, что собственные значения совершенно не связаны со способом формирования исходной матрицы. Диагональные элементы треугольной матрицы, напротив, зависят от порядка формирования строк (столбцов) матрицы.

Рассмотрим *первый вариант расчета*. В этом случае у нас имеется набор собственных чисел λ_{pl} , где p – номер собственного числа, а l – номер одного из параллельных определений. Далее решается стандартная статистическая задача – насколько собственное число для заданного уровня значимости отличается от нуля. Количество собственных чисел, отличных от нуля, и будет определять ранг матрицы $\mathbf{D}$, а следовательно и число компонентов в растворе. При получении комплексного числа необходимо предварительно определить его модуль, а затем ответить на вопрос о значимом отклонении от нуля.

По *второму варианту* после получения нескольких треугольных матриц в них рассматриваются одинаковые диагональные элементы и точно так же решается стандартная статистическая задача, чтобы определить, насколько диагональные элементы для заданного уровня значимости отличны от нуля. Число диагональных элементов, отличных от нуля, будет определять ранг матрицы $\mathbf{D}$ и, следовательно, число компонентов в растворе.

Еще *более строгим решением* является определение среднеквадратичной ошибки определения оптической плотности и розыгрыш данной величины методом имитационного моделирования для каждого значения оптической плотности. Для этого необходимо вычислить

$$X = s(R_1 + R_2 + \dots + R_{12} - 6) + m,$$

где X – нормально распределенная случайная величина; R_i – равномерно распределенная случайная величина; s – среднеквадратичное отклонение оптической плотности; m – среднее значение оптической плотности.

В электронных таблицах Excel имеется соответствующая функция получения случайного числа R_i – СЛЧИС(), а само значение можно получить из следующего выражения:

$$A3 = A1 + A2 * ((\text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() + \text{СЛЧИС}() - 6)).$$

Здесь в ячейке A1 – среднее значение; A2 – среднее квадратичное отклонение; A3 – результат.

При применении методов расчета, основанных на определении ранга матрицы оптических плотностей, следует учитывать, что по мере роста числа компонентов в растворе будет накапливаться ошибка как линейная функция этих чисел. Кроме того, необходимо быть уверенным, что закон Ламберта – Бугера – Бера

соблюдается во всем интервале длин волн и для всех растворов. Однако в практике редко встречается полное выполнение этого закона. Практически всегда существует ошибка между построенной калибровочной кривой и экспериментальными данными. Эта величина, по нашим данным, всегда сопоставима с ошибкой спектрофотометрического определения и даже превосходит ее. Поэтому в суммарную ошибку необходимо включать все накопленные ошибки и вычислять по следующей формуле:

$$S = (S_{\text{ЛББ}}^2 + S_{\text{спектр}}^2)^{0,5}.$$

Такое большое значение придается ошибке эксперимента по причине того, что результаты исследования при применении методики Каца – Уолесса сильно зависят от последней стадии поиска ранга матрицы оптических плотностей. Данный факт, безусловно, является недостатком такого подхода. Поэтому при использовании методики с определением числа линейно независимых строк матрицы следует придерживаться следующих правил:

1) необходимо начинать с матриц как можно меньшего размера, постепенно увеличивая число строк (столбцов). Так как ошибка зависит от определения D , то при прочих равных условиях лучше иметь матрицу, у которой число длин волн меньше, чем количество растворов;

2) следует отказаться от методик, описанных в [1], как по способу расчета, так и по использованию постоянного значения ошибки эксперимента для всего интервала оптических плотностей. Предложенная в данной статье методика определения ранга матрицы лишена всех недостатков, присущих методу Каца – Уолеса и его последующим модификациям (описанные выше недочеты). Прежде всего, это связано с тем, что любое преобразование заканчивается проверкой статистической гипотезы о равенстве нулю элементов той или иной матрицы, полученной с учетом истинного разброса экспериментальных данных;

3) если по каким-либо причинам нельзя получить матрицу ошибок, необходимо использовать растворы бихромата калия в 0,05 н. КОН в области 215...400 нм, растворы сульфата кобальта-аммония в слабом растворе серной кислоты или сульфата меди в разбавленном растворе серной кислоты в области 550...750 нм;

4) для подтверждения результатов необходимо использовать и другие методы определения числа компонентов в растворе. Очевидно, что в данном случае подходит метод разделения полос поглощения с помощью функции гауссиана $y = y_0 + A \exp(-(x - x_0)^2/w^2)$ и лоренциана $y = y_0 + 2A/\pi(w/(4(x - x_c)^2 + w^2))$. Возможно также использование второй производной для обработки спектров. При этом следует иметь статистически значимое подтверждение улучшения качества разделения при изменении числа компонентов;

5) необходимо выбирать длины волн, которые не характеризуются крутыми участками для зависимости « $D - \lambda$ ». При необходимости разбавления раствора ошибку определения следует учитывать как сумму ошибок разбавления и определения оптической плотности.

Экспериментальная часть. В качестве объекта исследования использовали метиловый красный (ч. д. а., ТУ 6-09-5169-84). Растворение метилового красного проводили в водно-спиртовом растворе по ГОСТ 4919.1-77. Реактивы и особо чистые вещества. Методы приготовления растворов индикаторов (с Изменением № 1). Спектрофотометрирование осуществляли на спектрофотометре Solar PB 2201 при 330...650 нм в кювете толщиной 1 см, в качестве раствора сравнения использовали раствор дистиллированной воды. Разделение спектров осуществляли при помощи программы Origin 8 с предварительным сглаживанием полученных данных по методу Савицкого – Голея.

Обсуждение результатов. В таблице представлены значения диагональных элементов квадратной матрицы, приведенной к треугольному виду, а также значение 3σ для них.

Треугольная матрица, полученная из матрицы DD^T

Номер параллельного определения	Диагональные элементы треугольной матрицы						
1	2,826	0,0923	0,0078	0,0138	0,0014	0,0021	–0,0013
2	2,901	0,0908	0,066	0,0091	–0,0009	–0,0007	0,0009
3	2,978	0,0909	0,0074	0,0123	–0,0001	0,0068	–0,0052
Среднее	2,902	0,091	0,027	0,012	0,000	0,003	–0,002
3σ	0,228	0,003	0,101	0,007	0,004	0,011	0,009

Очевидно, что первое, второе и четвертое значения статистически значимо отличаются от нуля. Таким образом, по формальным признакам в растворе находится три компонента. Данный результат совпал с графическим методом, изложенным в [2].

Одновременно проводился анализ разложения спектра на составляющие в виде гауссиан (рис. 1, 2). Для этого использовали спектры метилового красного при pH = 6,5 и 4,0. Для проверки наличия в растворе трех компонентов производили разложение спектра на 1, 2 и 3 гауссианы. В результате были получены неожиданные результаты. Ни один из спектров на три составляющие не делился. То есть формальное деление возможно, однако тогда третий пик частично находился бы в области отрицательных значений оптической плотности, а этого не может быть. Сумма квадратов отклонений опытных данных от расчетных для одного пика составила 0,004 для раствора с pH = 6,5. Для этого же раствора при разложении кривой на два пика эта же величина составила 0,0002. Результаты разложения представлены на рисунке 1.

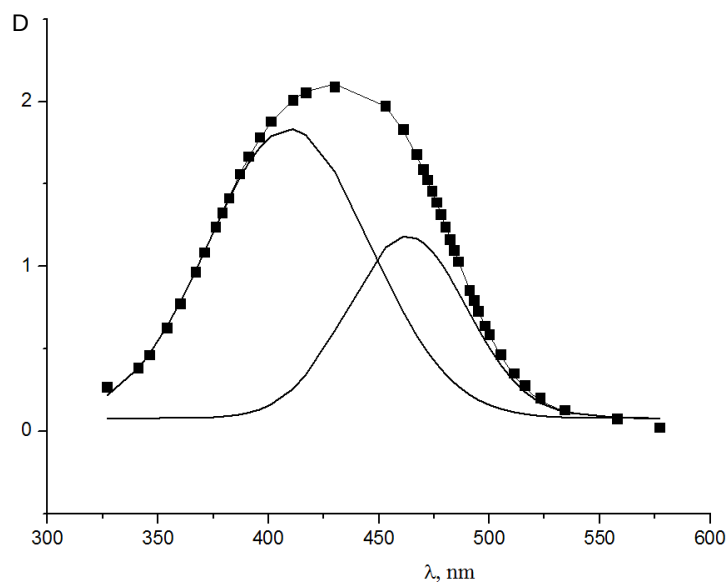


Рисунок 1 – Спектр метилового красного при pH = 6,5

Очевидно, что кривая разлагается на два пика с максимума 409 и 463 нм. Максимум на общей кривой составил 435 нм.

Аналогичная процедура была проделана с кривой, полученной при pH = 4,0 (рис. 2). Так же как и для первой кривой, было выделено два пика с максимума поглощения 516 и 554 нм. Максимум на общей кривой составил 548 нм.

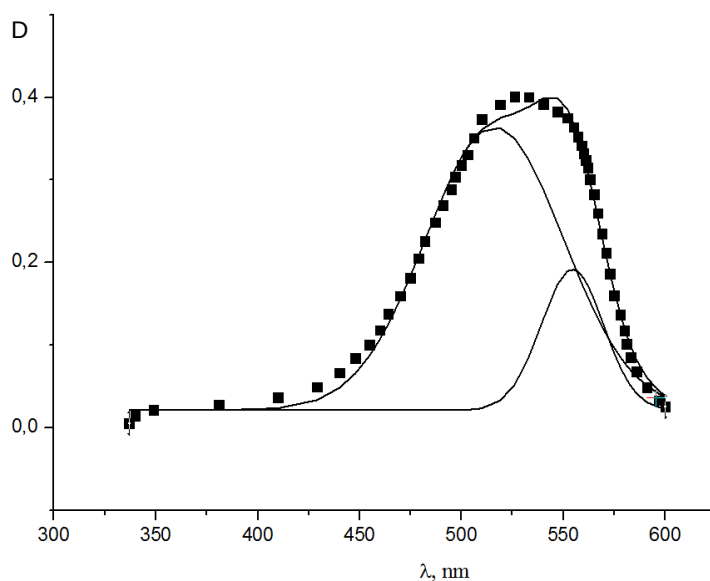


Рисунок 2 – Спектр метилового красного при pH = 4,0

Для раствора с $pH = 4,0$ сумма квадратов отклонений опытных данных от расчетных для одного пика составила 0,003. Для этого же раствора при разложении кривой на два пика эта же величина составила 0,0002. Следовательно, во всех случаях раствор можно считать состоящим из двух компонентов.

Таким образом, метиловый красный в водном растворе в спектрофотометрическом отношении представляет собой сумму двух компонентов. Удивление вызывает факт, что эти компоненты перемещаются по оси абсцисс при изменении pH . Согласно классической теории кислотно-основных индикаторов мы должны бы наблюдать изменение соотношения между этими двумя формами компонентов [3]. Скорее всего, это явление связано с образованием димеров. Так, в литературе [4] описано образование димеров метиленового голубого и фиолетового кристаллического, у которых максимумы димерных и мономерных форм отличались на 56 и 43 нанометров соответственно. Что касается метода определения числа компонентов при помощи определения числа рангов, то не следует забывать, что в исходном положении ранг матрицы произведения двух матриц – матрицы концентраций и матрицы молярных экстинкций – не должен превышать ранга матрицы сомножителей. Следовательно, ранг матрицы оптических плотностей следует толковать следующим образом: число компонентов в растворе равно или меньше ранга матрицы оптических плотностей.

Можно согласиться с авторами [5], которые при изучении спектрофотометрических характеристик метилового оранжевого нашли множество противоречий в сведениях о химико-аналитических характеристиках последнего. Очевидно, что и метиловый красный, несмотря на столетний срок его использования, можно отнести к таким же объектам.

Таким образом, показаны возможные проблемы при определении числа компонентов в растворе методом Каца – Уоллеса и его последующими модификациями. Рассмотрены пути, позволяющие уменьшить вероятность получения ошибочных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн, И.Я. Спектрофотометрический анализ в органической химии / И.Я. Бернштейн, Ю.Л. Каминский. – Л.: Химия, 1986. – 200 с.
2. Хартли, Ф. Равновесия в растворах / Ф. Хартли, К. Бегрес, Р. Оллок. – М.: Мир, 1983. – 360 с.
3. Крешков, А.П. Основы аналитической химии / А.П. Крешков. Т. 2. – Л.: Химия, 1971. – 456 с.
4. Коган, И.М. Химия красителей / И.М. Коган. – М.: Химия, 1956. – 696 с.
5. Иванов, В.М. Оптические, цветометрические и кислотно-основные характеристики метилового оранжевого / В.М. Иванов, М.Г. Цепков, В.Н. Фигуровская // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2, Химия. – 2010. – Т. 51, № 6. – С. 445–449.

Поступила 23.11.2015

MODIFIED METHOD FOR DETERMINING THE NUMBER OF COMPONENTS IN SOLUTION

M. ZILBERGLEIT, O. SHEVCHUK, V. FLEISHER, S.YAKUBOVSKIY

In the article are features of carrying out the analysis of ranges of organic compounds by Katz and Wallace's method and his subsequent modifications considered. Possibility of mistakes when using this approach is shown. Modification of a method of Katz and Wallace is offered. For this purpose the matrix of optical density of D needs to be transferred to a matrix of a type of DD^T and or to receive a set of own numbers for each parallel definition, or to receive a set of matrixes by transformation of a matrix of DD^T to the upper triangular matrix. In the first case define number of own numbers other than zero. In the second option define number of diagonal elements other than zero. Other recommendations which allow to increase definition accuracy also are provided in work. For example, control of quantity of components in solution by decomposition of a range of absorption on components. The example of implementation of the analysis for solution of the methyl red is given.

Keywords: range of organic compounds, method of Katz and Wallace, control the number of components, modified method, proper numbers, diagonal elements.

УДК 665.662.3

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СМЕШАННОГО РАСТВОРИТЕЛЯ N-МЕТИЛПИРРОЛИДОН–ТРИЭТИЛЕНГЛИКОЛЬ–ВОДА НА КАЧЕСТВО ПОЛУЧАЕМЫХ ЭКСТРАКТА И РАФИНАТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ РИФОРМАТОВ

канд. хим. наук, доц. С.В. ПОКРОВСКАЯ; В.В. КУДРЯВЦЕВ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается вопрос улучшения энергетической эффективности и качества получаемых экстракта и рафината в процессе экстракции ароматических углеводородов на установке ЛГ-35/8-300Б ОАО «Нафтан». Показана зависимость качества экстракта и рафината от соотношения N-МП : ТЭГ и содержания воды в растворителе. Установлен оптимальный состав смешанного растворителя. Приведено распределение углеводородов по теоретическим тарелкам экстрактора. Сделаны выводы об экономической эффективности использования смешанного растворителя.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, процесс экстракции, экстракт и рафинат, ароматические углеводороды, оптимальный состав растворителя.

Введение. Промышленный комплекс по получению ароматических углеводородов представляет собой химико-технологическую систему, состоящую из взаимосвязанных промышленных установок каталитического риформинга и деароматизации катализата. Изучение процесса экстракции ароматических углеводородов из продуктов каталитического риформинга – важная и актуальная научно-прикладная задача. На установке типа ЛГ-35/8-300Б ОАО «Нафтан» для экстракции ароматических углеводородов применяют растворитель триэтиленгликоль (ТЭГ) с содержанием воды 4...10% масс.

Существующий процесс экстракции ароматических углеводородов имеет ряд недостатков:

- высокая температура проведения процесса, приводящая к осмолению растворителя, а следовательно и к увеличению затрат на переработку;
- высокая температура кипения ТЭГа приводит к необходимости его вакуумной регенерации;
- большая массовая кратность циркуляции растворитель : сырье 8...10 : 1 из-за низкого коэффициента распределения аренов;
- большой расход рециркулирующих потоков (рисайкла) и предбензольной фракции, составляющий суммарно до 100% масс. на сырье;
- высокая вязкость, снижающая коэффициент полезного действия контактных устройств;
- высокая селективность по молекулярным массам – при высоких значениях $\lg(\gamma_{\text{окт}}^0 / \gamma_{\text{гн}}^0)$ коэффициенты активности высших аренов и низших алканов и циклоалканов окажутся близкими, и эффективность процесса экстракции снизится.

Существуют растворители, которые лишены приведенных недостатков, однако полная замена растворителя привела бы к частичной или полной замене технологического оборудования, что в настоящее время не представляется возможным, поскольку ОАО «Нафтан» осваивает семь основных инвестиционных проектов, а также ряд объектов, имеющих вспомогательное и экологическое значение [1]. Это обуславливает практико-ориентированное направление и актуальность настоящего исследования.

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика применяющихся в промышленности селективных растворителей, где $\left(\frac{\gamma_{\text{г}}^0}{\gamma_{\text{б}}^0} \cdot \frac{1}{\gamma_{\text{б}}^0}\right)$ – критерий эффективности.

Таблица 1 – Селективность и растворяющая способность экстрагентов ароматических углеводородов [2]

Экстрагент	T, °C	$\gamma_{\text{г}}^0$	$\gamma_{\text{б}}^0$	$\gamma_{\text{г}}^0 / \gamma_{\text{б}}^0$	$\gamma_{\text{ц}}^0 / \gamma_{\text{б}}^0$	$\lg \frac{\gamma_{\text{окт}}^0}{\gamma_{\text{гн}}^0}$	$1/\gamma_{\text{б}}^0$	$\left(\frac{\gamma_{\text{г}}^0}{\gamma_{\text{б}}^0} \cdot \frac{1}{\gamma_{\text{б}}^0}\right)$
Сульфолан	30	72,0	2,43	29,6	13,9	0,154	0,412	12,2
	80	38,4	2,49	15,4	–	0,112	0,402	6,2
N-метилпирролидон	30	14,2	1,08	13,1	7,90	0,086	0,926	12,1
	60	9,9	1,08	9,17	–	0,057	0,926	8,5
N-формилморфолин	30	34,6	2,03	17,1	10,0	0,133	0,493	8,4
	61,7	24,7	1,99	12,4	–	0,115	0,503	6,2
Триэтиленгликоль	30	60,6	3,86	15,7	7,24	0,168	0,259	4,1
	80	30,4	3,02	10,1	–	0,126	0,331	3,3
Тетраэтиленгликоль	30	37,7	2,46	15,3	7,54	0,171	0,407	6,2
	70	24,8	2,48	10,0	–	–	0,403	4,0
Диметилсульфоксид	20	92,0	3,83	24,0	11,4	0,169	0,261	6,3
	60	48,0	3,03	15,8	–	0,126	0,330	5,2

Из таблицы видно, что по групповой селективности к системам «алкан – арен» N-метилпирролидон (N-МП) уступает ряду экстрагентов, применяющихся в промышленности для выделения аренов из риформатов, таким как сульфолан, диметилсульфоксид, N-формилморфолин, три- и тетраэтиленгликоль. При выделении аренов из смесей с циклоалканами N-МП уступает по селективности лишь первым трем перечисленным промышленным растворителям, но более избирателен, чем полигликолид. По величине комплексного критерия эффективности, учитывающего сочетание групповой селективности и растворяющей способности, N-МП превосходит все применяющиеся экстрагенты, кроме сульфолана. По критерию эффективности при разделении модельной системы «гексан – бензол» эти растворители находятся на одном уровне, а при разделении системы «циклогексан – бензол» N-МП должен быть более эффективен даже по сравнению с сульфоланом [3]. При сравнении физико-химических свойств экстрагентов (табл. 2) можно сделать следующие *выводы*: сульфолан имеет высокую температуру плавления, что может ограничить его использование; N-метилпирролидон имеет наименьшую динамическую вязкость, что позволит увеличить КПД ступеней контакта; N-метилпирролидон менее токсичен по отношению к сульфолану.

Таблица 2 – Физико-химические свойства экстрагентов аренов [4]

Экстрагенты	ρ_4^{20}	$T_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	η (при 20 $^\circ\text{C}$), МПа·с	C_p (при 20 $^\circ\text{C}$), кДж/кг·К	$H_{\text{исп}}$ (при 25 $^\circ\text{C}$), кДж/моль	σ (при 20 $^\circ\text{C}$), мН/м	ПДК, мг/м ³
Сульфолан	1,2604 (30 $^\circ\text{C}$)	285	28,4	10,0 (30 $^\circ\text{C}$)	1,34 (30 $^\circ\text{C}$)	61,5 (200 $^\circ\text{C}$)	60,33 (40 $^\circ\text{C}$)	50
N-метилпирролидон	1,0328	202	–24	1,65	1,97	53,06	39,91	100
N-формилморфолин	1,1528	244	20...21	9,37	1,97	46,06	–	–
Триэтиленгликоль	1,1242	285	–4,3	49,0	2,17	71,6	45,57	–
Тетраэтиленгликоль	1,1247	327,3	–6,2	61,3	2,14	88,8	45 (25 $^\circ\text{C}$)	–
Диметилсульфоксид	1,0960	189	18,45	2,473	2,05	57,28	43,49	20

При выборе оптимального экстрагента также необходимо принимать во внимание их термическую и химическую стабильность и коррозионную активность. Сульфолан является химически инертным веществом и термически стабилен до 220 $^\circ\text{C}$. У сульфолана как обводненного, так и безводного коррозионная активность даже при 200 $^\circ\text{C}$ незначительна [5].

N-метилпирролидон химически стабилен, поэтому его часто используют в качестве инертной реакционной среды. В инертной атмосфере N-МП стабилен до температуры выше 300 $^\circ\text{C}$, а температура начала разложения чистого N-МП составляет 320 $^\circ\text{C}$. Однако N-МП, стабильный в инертной среде, обладает лишь ограниченной стойкостью к воздействию кислорода. При хранении на воздухе кислород растворяется в N-МП и образует перекиси. Реакция автоокисления ускоряется под воздействием света. В слабокислых или слабоосновных водных растворах даже при температуре 100 $^\circ\text{C}$ N-МП гидролизуеться очень медленно. Однако при действии водных растворов сильных кислот и щелочей он быстро омыляется до 4-метиламиномасляной кислоты. N-метилпирролидон является коррозионно-активным веществом. Скорость коррозии резко возрастает при повышении температуры от 100 до 300 $^\circ\text{C}$. Однако коррозия обусловлена коррозионной активностью не самого N-МП, а продуктов его превращения при нагревании и гидролизе [3]. N-метилпирролидон обладает практически одинаковым комплексным критерием эффективности с сульфоланом, однако его эксплуатация затрудняется его коррозионной активностью, которая легко нивелируется введением в систему ингибитора коррозии, снижением температуры процесса и поддержанием системы под небольшим избыточным давлением. При этом основной недостаток сульфолана заключается в том, что при нормальных условиях он является твердым веществом. Поэтому для его хранения и перекачки необходимо держать его в нагретом состоянии. Также сульфолан имеет ПДК в 2 раза ниже, чем у N-МП, что требует дополнительных мер защиты людей при его использовании.

Исследовательская часть. Целью настоящей работы является изучение влияния смешанного растворителя N-МП–ТЭГ–вода на качество получаемых экстракта и рафината и выбор оптимального соотношения смешанного растворителя для проведения процесса экстракции ароматических углеводородов из риформата на существующей установке ЛГ-35/8-300Б ОАО «Нафтан». В качестве объекта исследования выбрана экстракционная колонна, состоящая из 45 теоретических тарелок, что соответствует практическому числу ступеней промышленного экстрактора. В качестве сырья использовался риформат, углеводородный состав которого был определен хроматографическим методом в центральной заводской лаборатории ОАО «Нафтан». Состав риформата приведен в таблице 3.

Для моделирования процесса экстракции ароматических углеводородов применялась программа моделирования технологических процессов PRO II v.9.1. Метод расчета был выбран NRTL (Non-Random-Two-Liquids). Моделирование проводилось при температуре растворителя 60 $^\circ\text{C}$ и кратности циркуляции растворитель : сырье 4 : 1, поскольку такие параметры рекомендованы при проведении процесса Arosolvan», однако в нем применялся N-метилпирролидон и диэтиленгликоль [2].

Таблица 3 – Состав риформата, поступающего на экстракцию

Углеводороды	% масс.
н-Алканы	22,22
и-Алканы	33,31
Арены	14,59
в том числе:	
бензол	0,31
толуол	1,12
ксилолы	3,20
этилбензол	1,08
Циклоалканы	29,88

На первом этапе моделирования использовался безводный смешанный растворитель, поскольку N-МП в смеси с водой является коррозионно активным веществом. Зависимости степени извлечения углеводородов от соотношения ТЭГ : N-МП приведены на рисунке 1. Влияние соотношение компонентов растворителя на содержание углеводородов в экстракте показано на рисунке 2.

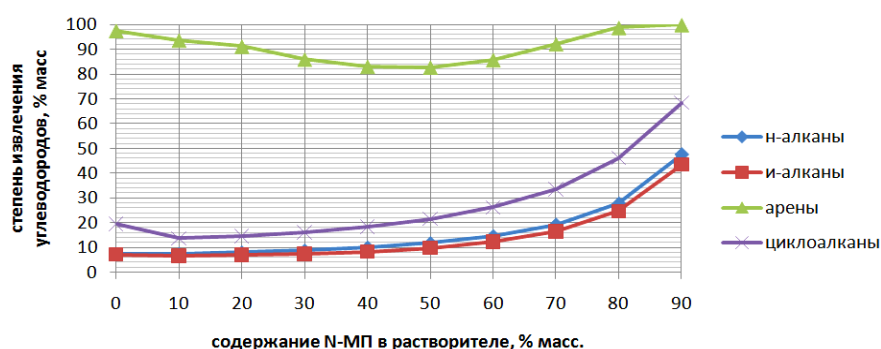


Рисунок 1 – Зависимость степени извлечения углеводородов от соотношения N-МП : ТЭГ

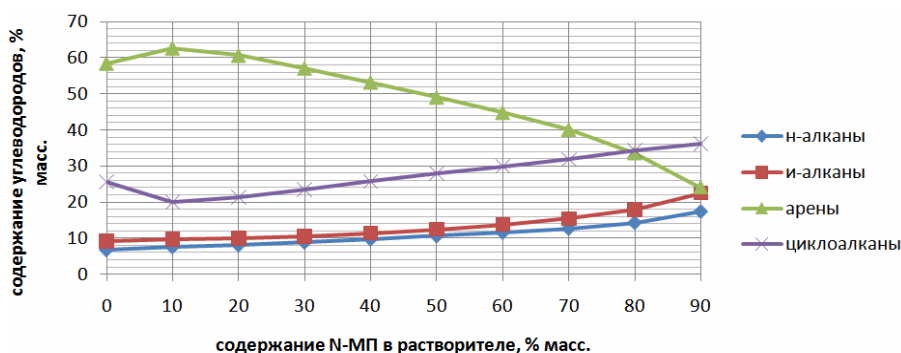


Рисунок 2 – Влияние соотношения компонентов растворителя на содержание углеводородов в экстракте

При добавлении N-МП в ТЭГ происходит увеличение общего содержания ароматических углеводородов в экстракте за счет снижения содержания циклоалканов. При увеличении содержания N-МП в растворителе происходит небольшое снижение степени извлечения ароматических углеводородов (до 40% масс. N-МП). При содержании N-МП 30% масс. в растворителе наблюдается такое же содержание ароматических углеводородов в экстракте, как и в случае использования чистого ТЭГа. Дальнейшее увеличение содержания N-МП в смешанном растворителе приводит к увеличению емкости растворителя, что приводит к повышению степени извлечения как ароматических, так и неароматических углеводородов. Иными словами, происходит увеличение количества экстракта при снижении его качества, однако качество рафината значительно увеличится (содержание ароматических углеводородов в рафинате составит до 0,12% масс.). При содержании N-МП в растворителе 30% масс. наблюдается одинаковое содержание ароматических углеводородов в экстракте по сравнению с чистым ТЭГом. Содержание нежелательных циклоалканов ниже на 17% масс., н-алканов – на 18, и-алканов – на 6% масс. выше по сравнению с базовым вариантом без N-МП.

На втором этапе моделирования использовался смешанный растворитель с содержанием воды 4% масс., поскольку ТЭГ как основной компонент смешанного растворителя проявляет наилучшие харак-

теристики именно при содержании воды до 4% масс. Зависимости степени извлечения углеводородов от соотношения ТЭГ : N-МП приведены на рисунке 3. Влияние соотношение компонентов растворителя на содержание углеводородов в экстракте показано на рисунке 4.

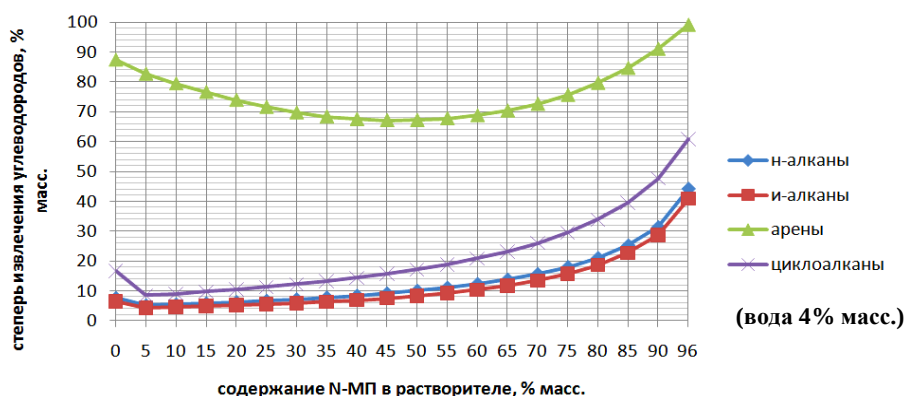


Рисунок 3 – Зависимость степени извлечения углеводородов от соотношения N-МП : ТЭГ

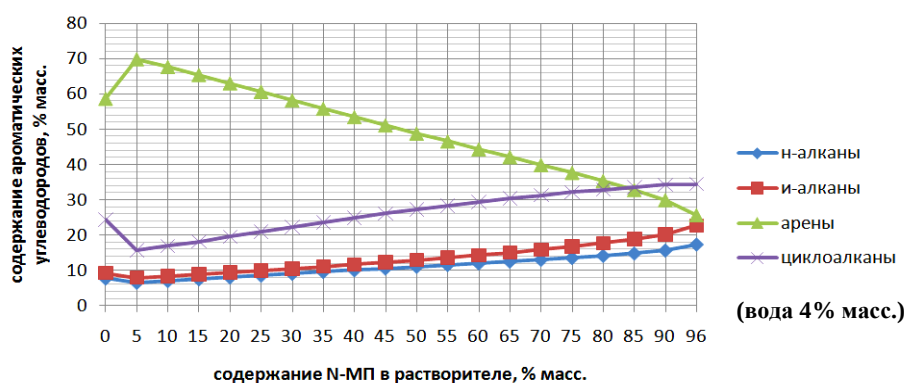


Рисунок 4 – Влияние соотношения компонентов растворителя на содержание углеводородов в экстракте

При добавлении N-МП в обводненный ТЭГ происходит резкое увеличение содержания ароматических углеводородов в экстракте на 11%, снижение содержания циклоалканов, н-алканов, и-алканов на 10, 1,2 и 1,3% масс. соответственно. При содержании N-МП в растворителе 30% масс. наблюдается одинаковое содержание ароматических углеводородов в экстракте по сравнению с чистым ТЭГом, однако значительно ниже содержание нежелательных циклоалканов на 27% масс., н-алканов – на 6% масс., и-алканов на 9% масс. по сравнению с базовым вариантом без N-МП. Дальнейшее увеличение воды в растворителе приводит к еще большему снижению общего количества извлеченных ароматических углеводородов, что нежелательно.

Существующие процессы экстракции ароматических углеводородов проводятся с подачей рисайкла в нижнюю часть экстракционной колонны, что обеспечивает повышение концентрации ароматических углеводородов в насыщенном растворителе, выводимом из экстрактора. Состав рисайкла, применяемого на установке ЛГ-35/8-300Б ОАО «Нафтан», определен хроматографическим методом в ЦЗЛ ОАО «Нафтан». Состав рисайкла приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Углеводородный состав рисайкла

Продукт	рисайкл
Углеводородный состав	% масс.
Алканы	
гексан	15,97
Арены	
бензол	70,15
толуол	13,28
этилбензол	0,25
параксилол	0,13
метаксилол	0,2
ортоксилол	0,01
C ₉	0,01

Моделирование проводилось при кратности циркуляции смешанный растворитель : сырье 6 : 1 и соотношении рисайкл : сырье, равном 0,4 : 1.

В результате моделирования получены данные по содержанию углеводородов на тарелках в экстракционной колонне без подачи рисайкла (рис. 5) и с подачей рисайкла (рис. 6).

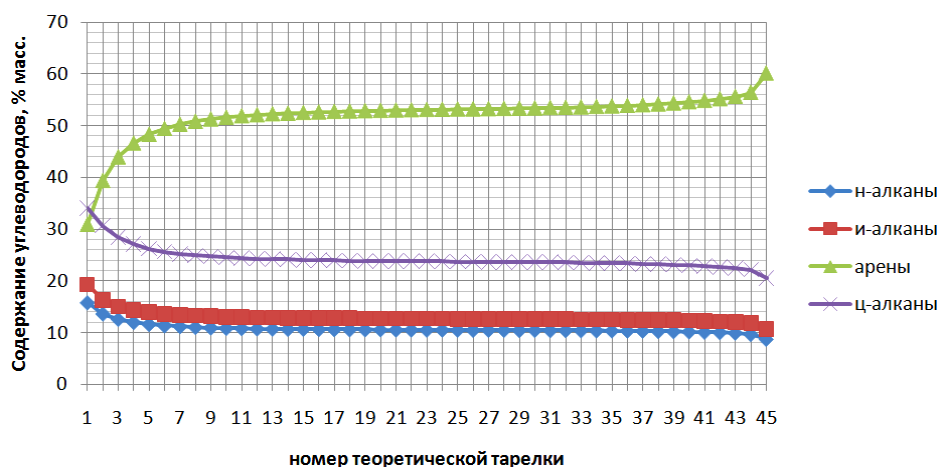


Рисунок 5 – Содержание углеводородов на тарелках в экстракторе

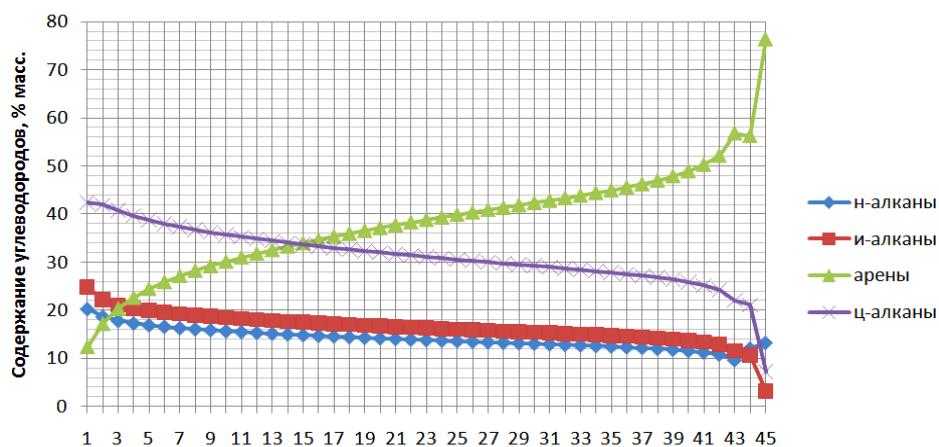


Рисунок 6 – Содержание углеводородов на тарелках в экстракторе при введении рисайкла

Основываясь на полученных данных, можно сделать *выводы*, что введение рисайкла положительно влияет на качество получаемого экстракта, а именно:

- происходит увеличение содержания ароматических углеводородов в экстракте до 77,6% масс., что на 23,4% масс. выше, чем без использования рисайкла;
- снижается содержание циклоалканов до 6,5% масс., что на 17,7% масс. ниже, чем без использования рисайкла;
- содержание и-алканов также снизилось до 2,7% масс., что на 8,8% масс. ниже, чем без использования рисайкла;
- снижение кратности циркуляции растворитель: сырье позволяет увеличить производительность экстрактора до 50% масс. по сырью.

Однако содержание н-алканов увеличилось до 13,2% масс., что на 3,2% выше, чем без использования рисайкла. Это можно объяснить дополнительным введением в систему н-алканов рисайкла.

Сравнение результатов моделирования базового варианта и смешанного растворителя N-МП–ТЭГ–вода в соотношении 30 : 66 : 4% масс. соответственно приведены в таблице 5.

На основании полученных данных можно сделать *выводы*, что использование смешанного селективного растворителя N-МП–ТЭГ–вода в процессе экстракции ароматических углеводородов бензиновых фракций имеет существенные преимущества:

- 1) снижение температуры процесса на 80 °С позволяет снизить энергозатраты на нагрев растворителя с 105,8 до 24 МДж/ч;
- 2) снижение кратности циркуляции с 8 : 1 до 6 : 1 позволяет снизить потребление электроэнергии с 92 до 15 кВт/ч;

- 3) снижение кратности рисайкл : сырье с 1 : 1 до 0,4 : 1 снижает потребление электроэнергии с 11,5 до 1,5 кВт/ч;
- 4) увеличение содержание углеводов в экстракте на 21,7% масс.;
- 5) увеличение производительности экстрактора по сырью за счет снижения циркулирующих потоков на 50% масс.

Таблица 5 – Сравнительная характеристика ТЭГ и N-МП–ТЭГ

Наименование показателя	Значения	
	ТЭГ	N-МП–ТЭГ
Растворитель		
Состав растворителя	ТЭГ 96% масс. Вода 4% масс.	N-МП 30% масс. ТЭГ 66% масс. Вода 4% масс.
Давление в экстракционной колонне, кПа	800	200
Температура процесса, °С	140	60
Кратность растворитель : сырье	8 : 1	6 : 1
Кратность рисайкл : сырье	1	0,4
Степень извлечения ароматических углеводов, % масс.	98	97
Общее количество ароматических углеводов в экстракте, % масс.	55,9	77,6
Производительность экстрактора по сырью, т/ч	50	75

Заключение. Данные проведенных исследований доказывают, что предложенный комбинированный селективный растворитель N-МП–ТЭГ–вода в соотношении 30 : 66 : 4% масс. является целесообразной заменой существующего селективного растворителя ТЭГ–вода в соотношении 96 : 4% масс. при проведении экстракции ароматических углеводов, поскольку его использование позволяет снизить затраты на нагрев на 81,8 МДж/ч, расход электроэнергии на 80 кВт/ч, а также незначительно увеличить производительность экстрактора по сырью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вестник Нафтана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gazeta.naftan.by/wp-content/files/06-02-16.pdf>. – Дата доступа: 05.02.2016.
2. Гайле, А.А. Процессы разделения и очистки продуктов переработки нефти и газа: учеб. пособие / А.А. Гайле, В.Е. Сомов. – СПб., 2012.
3. Гайле, А.А. N-метилпирролидон. Получение, свойства и применение в качестве селективного растворителя / А.А. Гайле, Г.Д. Залищевский. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005.
4. Гайле, А.А. Ароматические углеводороды: выделение, применение рынок: справ. / А.А. Гайле, В.Е. Сомов, О.М. Варшавский. – СПб.: Химиздат, 200. – 544 с.
5. Сульфолан: свойства и применение в качестве селективного растворителя / А.А. Гайле [и др.]. – СПб.: Химиздат, 1998. – 144 с.
6. Фролов, В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» / В.Ф. Фролов. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2003. – 608 с.

Поступила 08.02.2016

THE EFFECT OF THE COMPOSITION OF THE MIXED SOLVENT N-MP–TEG–WATER ON THE QUALITY OF THE EXTRACT AND RAFFINATE DURING THE EXTRACTION OF AROMATIC HYDROCARBONS FROM REFORMATE

S. POKROVSKAYA, V. KUDRYAVTSEV

The article deals with the issue of improving energy efficiency and improving the quality of the extract and raffinate in the process of extraction of aromatic hydrocarbons from the installation LG-35/8-300B JSC “Naftan”. It shows the dependence of the extract and raffinate N-MP–TEG ratio in a solvent and depending on the water content in the solvent. The distribution of the hydrocarbons theoretical plates in extractor are given. The conclusion of economic efficiency of a mixed solvent N-MP–TEG–water are performed.

Keywords: energy efficiency, process of extraction, extract and raffinate, aromatic hydrocarbons, optimal composition solvent.

УДК 665.775

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ****Н.П. СУХОВИЛО; канд. техн. наук, доц. С.М. ТКАЧЕВ
(Полоцкий государственный университет)**

Устанавливается взаимосвязь структуры поверхностного микрорельефа и свойств дорожных битумов, полученных по различным технологиям. Показано, что предпочтительной является структура, представленная одиночными глобулами или мелкими (до 10 мкм) гофрами, характерная для остаточных и компаундированных битумов, которые обладают большим интервалом пластичности и большей растяжимостью по сравнению с другими. Установлено, что поверхностный микрорельеф битумов чувствителен к вводимым в них добавкам, при этом изменение структуры битумов сопровождается изменением их свойств.

Ключевые слова: дорожные битумы, структура, поверхностный микрорельеф, температура размягчения, температура хрупкости, пенетрация, растяжимость.

Введение. Одна из основных областей применения отечественного битума (около 70%) – дорожное строительство, что объясняется высокой степенью механизации изготовления асфальтобетонных покрытий и их относительно низкой стоимостью (они обычно в 2...2,5 раза дешевле покрытий из цементобетона). Асфальтобетон обладает такими достоинствами, как возможность устройства тонких слоёв, высокая демпфирующая способность и ремонтоспособность, низкий уровень шума, технологичность. Однако, как и любой другой материал, асфальтобетон имеет свои пороговые параметры надёжности и долговечности. Ежегодный прирост интенсивности движения, увеличение нагрузок на ось и массы транспортных средств, резкие циклические перепады температур приводят к быстрому разрушению материала покрытий и дорожных одежд в целом. Межремонтные сроки службы дорожных покрытий в городах составляют 2...3 года, за городом – около 4...6 лет, что требует больших капитальных затрат. В то же время отказ от применения асфальтобетонных покрытий и замена их цементобетоном нецелесообразны по ряду причин: устройство цементобетонных покрытий требует повышенных материальных затрат, цементобетон обладает низкой ремонтпригодностью и долговечностью в условиях интенсивного воздействия химических реагентов, которые применяются в борьбе с гололёдом, особенно в городских условиях [1].

Свойства асфальтобетона и его поведение в процессе эксплуатации во многом зависят от характеристик вяжущего материала. Для того чтобы асфальтобетон обладал такими свойствами, как прочность на сжатие, деформативность, теплоустойчивость, морозостойкость, необходимо наличие у битума соответствующего комплекса структурно-механических свойств, а также хорошего сцепления с зёрнами минерального материала [2].

Основная часть. В настоящее время общепризнанной является точка зрения, согласно которой битумы представляют собой дисперсные системы, их свойства зависят не только от их группового состава, но и от концентрации дисперсной фазы, строения дисперсных частиц и их агрегатов.

Значительное число исследователей считают, что битумы состоят из трёх составных частей: лиофобных дисперсных частиц (асфальтенов), лиофильных соединений (смола), окружающих лиофобные частицы и препятствующих их сливанию и масляной фазы, в которой они суспендированы. Структурообразование в битуме связывают прежде всего с асфальтенами. При этом определяющими факторами структурообразования являются концентрация и структурное состояние асфальтенов, зависящее от дисперсионной среды битума [3–7]. Различия во взглядах обнаруживаются при объяснении принципов построения самой структуры, а также характера и вида взаимодействия в ней.

Ряд ученых отвергают модель стабилизации асфальтенов смолами, так как она основана на умозрительных заключениях и не имеет прямых экспериментальных подтверждений. В качестве доказательства приводятся результаты экспериментов, которые свидетельствуют об отсутствии прямого влияния смол на закономерности агрегирования асфальтенов [8].

По классификации, приведенной в работе [3], дисперсные системы по отсутствию или наличию взаимодействия между частицами делятся на свободнодисперсные и связнодисперсные. Некоторые исследователи эти состояния называют соответственно золь и гель.

В работе [9] предложена следующая модель, описывающая строение битума со структурой геля. Асфальтеновые молекулы в результате взаимодействия друг с другом, а также с высокоароматизированными компонентами образуют комплексы, которые напоминают кристаллиты. При образовании комплексов отдельные сегменты асфальтенов и тяжёлых ароматических компонентов могут взаимно распо-

лагаться таким образом, что они образуют структурную сетку эластичного геля, отдельные элементы которого окружены молекулами масляной фазы. Этот процесс происходит медленнее, чем формирование комплексов, поэтому степень структурированности таких битумов со временем увеличивается. Между двумя крайними структурами (геля и неупорядоченной – золя) имеются промежуточные структуры, которые состоят из относительно крупных структурных элементов, не соединённых между собой и не образующих сплошной структуры.

В работах А.С. Колбановской предложена классификация структур, характерных для битумов, аналогичная разделению на системы типа «гель», «золь» и «золь-гель». Битум А.С. Колбановская рассматривает как пространственную дисперсную систему, в которой дисперсная фаза – асфальтены, а дисперсионная среда состоит из парафинонафтоновых, ароматических углеводородов и смол. Асфальтены набухают в дисперсионной среде, которая структурирована смолами в различной степени [5; 10].

Структура I типа («гель») представляет собой коагуляционную сетку-каркас из асфальтенов, которые находятся в слабо структурированной смолами дисперсионной среде. Битумы I типа содержат свыше 25% (масс.) асфальтенов, менее 24% смол и более 50% масляных углеводородов. Такие битумы обладают пластичностью в широком интервале температур, тиксотропностью, заметным пределом текучести, пологой вязкостно-температурной кривой. Однако они малопрочны, обладают низкими когезией и растяжимостью. Данные битумы получают окислением гудрона с малой глубиной отбора масел из мазута, компаундированием глубокопереокисленных битумов с экстрактами селективной очистки масел.

Структура II типа («золь») – это предельно стабилизированная разбавленная суспензия асфальтенов в дисперсионной среде, сильно структурированной смолами. Асфальтены не взаимодействуют и не связаны между собой. Битумы II типа содержат не более 18% (масс.) асфальтенов, свыше 36% смол и не более 48% масел. Эти битумы имеют узкий интервал пластичности, нетиксотропны, дают резкие изменения вязкости с изменением температуры. Получают битумы II типа при незначительном доокислении гудронов после большого отбора масел; компаундированием асфальта деасфальтизации с экстрактами селективной очистки масел; из асфальта деасфальтизации. К ним относятся также остаточные битумы, полученные при перегонке лёгких масляных нефтей.

Структура III типа («золь-гель») описана как система, в которой существуют зародыши коагуляционной структуры, но отсутствует сплошной коагуляционный каркас. Дисперсионная среда структурирована смолами в значительно большей степени, чем среда битумов I типа, но в меньшей степени, чем среда битумов II типа. Битумы III типа имеют промежуточный состав и содержат не более 21...23% (масс.) асфальтенов, 30...34% смол, 45...49% масел. По свойствам эти битумы занимают промежуточное положение и считаются наиболее приемлемыми для дорожных покрытий. Получают такие битумы непрерывным окислением гудронов средней глубины отбора масел, компаундированием переокисленных битумов (до температур размягчения 56...60 °C) с гудроном, а также из тяжёлых смолистых нефтей путём глубокого отбора масел. Структура III типа, по мнению А.С. Колбановской, является предпочтительной для дорожных битумов.

По данным Б.Г. Печеного [11], при изменении структуры битума от золя к гелю наблюдаются следующие явления:

- понижаются температура растрескивания и температура хрупкости (для образцов с одинаковой пенетрацией при 25 °C);
- повышается устойчивость к усталостному механическому воздействию в интервале температур от минус 30 °C до 0;
- чувствительность битумов к скорости механического нагружения постоянно снижается;
- снижается устойчивость к термоокислительному старению.

По сравнению с битумами других структур, минимальной чувствительностью показателей трещиностойкости к скорости охлаждения обладают битумы типа «золь-гель». По мере увеличения числа изгибов при 0 °C температура хрупкости повышается более быстро для битумов со структурой, близкой к гелю, чем для битумов со структурой «золь-гель» или близкой к золю [11].

В работе [12] в качестве одной из причин, способствующих снижению долговечности дорожных покрытий, рассматривается структурообразование в битуме в результате взаимодействия асфальтовых молекул. Данный процесс приводит к повышению теплостойкости битумов, но при этом сопровождается уменьшением объёма. Это вызывает в дорожных покрытиях деформации ползучести при повышенных температурах и внутренние напряжения при отрицательных, что способствует их растрескиванию.

Для неокисленных битумов характерно наличие более мелких дисперсных частиц (85...86% коллоидных образований с размерами 9...10 нм) по сравнению с окисленными (69...70% коллоидных частиц с размером до 440 нм) [13]. На основании этих данных неокисленные битумы можно отнести к системам типа «золь», а окисленные – к системам типа «золь-гель». При этом по своим свойствам неокисленные битумы имеют ряд преимуществ перед окисленными: характеризуются большей пластичностью

и хорошими адгезионными характеристиками, способствуют обеспечению повышенной гидрофобности асфальтобетонов и увеличивают долговечность дорожного покрытия [13–16].

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что исследователи рассматривают структурное состояние битумов в качестве одного из факторов, влияющих на их свойства. Однако предложенные модели строения битумов основываются на результатах, полученных при помощи косвенных методов исследования структуры, т.е. в основе этих методов лежит изучение макроскопических характеристик объекта (например, реологических свойств).

В работах [17; 18] предложен метод исследования структуры поверхностного микрорельефа битумов и нефтяных остатков с помощью оптического микроскопа. Данный метод основан на использовании термодиформационного травления для подготовки анализируемых продуктов и позволяет непосредственно изучать структуру битумов и нефтяных остатков без её разрушения и изменения (на основе анализа поверхностного микрорельефа образцов). Основными типами структурных элементов, выявленных на поверхности битумов и нефтяных остатков, являются гофры (участки с поперечными волнообразными складками) и глобулы (мелкодисперсные округлые частички). Кроме указанных структурных элементов, возможно формирование скоплений гофр и глобул; дендритных структур различного строения; элементов крупноглобулярного типа в виде эллипса, а также элементов, имеющих форму тора. Методом вискозиметрии было доказано, что гофры и глобулы являются структурными образованиями битума, так как вязкость образцов после подготовки, аналогичной термодиформационному травлению, существенно больше вязкости исходных битумов [19].

Кроме оптической микроскопии, для исследования образцов, подготовленных методом термодиформационного травления, использовалась сканирующая зондовая микроскопия (атомно-силовая микроскопия), позволяющая получать изображения объекта с нанометровым разрешением. Характерный микрорельеф поверхности битума устойчиво выявляется при помощи атомно-силовой микроскопии, следовательно, структурные элементы микрорельефа являются реальными объектами, так как данный метод исследования основан на регистрации силовых взаимодействий между сенсором и поверхностью образца.

Согласно результатам исследований, структура дорожных битумов, выявляемая при помощи описанной выше методики, зависит от ряда факторов, в том числе от способа получения битума, наличия добавок в составе битума и др.

В качестве объектов исследования использовались такие образцы:

- остаточные битумы фирмы «Nynas», произведенные из тяжёлой нефтеновой венесуэльской нефти путем её вакуумной перегонки;
- окисленные битумы ОАО «Нафтан», полученные из гудрона смеси западно-сибирских нефтей;
- окисленный битум из гудрона высокосмолистой нефти Ярегского месторождения;
- компаундированные битумы ОАО «Нафтан», полученные путём смешения переокисленного битума с гудроном.

Технические свойства битумов определены в соответствии со стандартными методиками и представлены в таблице.

Свойства исследованных образцов

Наименование продукта и производитель	Номер образца	Температура размягчения, °С	Температура хрупкости, °С	Пенетрация при 25 °С, 0,1 мм	Растяжимость при 25 °С, см
Остаточные дорожные битумы фирмы «Nynas» (Швеция), полученные из венесуэльской нефти:					
- В-120	1	41	–8	122	>100
- В-60	2	48	–2,5	53	>100
Окисленные дорожные битумы:					
- БНД 90/130, ОАО «Нафтан»	3	44	–17	130	68
- БНД 90/130, ОАО «Нафтан»	4	46	–17	100	80
- БНД 90/130, ОАО «Нафтан»	5	48	–	95	70
- БДУ, ЗАО «Битран» (Ухта, Россия)	6	45	–17	108	>100
- БНД 60/90, ОАО «Нафтан»	7	51	–15	67	56
Компаундированные дорожные битумы:					
- БНД 90/130, ОАО «Нафтан»	8	51	–20	105	104
- БНД 60/90, ОАО «Нафтан»	9	62	–16	70	70

Полученные результаты показывают, что битумы с близкими температурами размягчения могут значительно отличаться по показателям растяжимости и пенетрации. При этом фиксируются существенные структурные отличия битумов (при одинаковых условиях формирования структуры). Приведенные ниже данные по исследованию структуры битумов были получены при следующих условиях подготовки проб: нагревание в течение 20 минут при 180 °С и последующее охлаждение со средней скоростью 0,1...0,5 °С в минуту.

Битумы со структурой, представленной одиночными глобулами (со средним размером 0,5...1 мкм), обладают высокой растяжимостью (более 100 см при 25 °С) и относительно высокой температурой хрупкости (образцы № 1 и № 2).

Окисленные битумы № 3...5 имеют гофрированную структуру (длина гофровых элементов достигает 10...50 мкм), причём гофровые элементы окружены участками мелкозернистого строения. Для данных образцов характерны значительно более низкие температуры хрупкости, но при этом и меньшая пластичность по сравнению с образцами № 1, 2 (растяжимость при 25 °С составляет 68...80 см). Битум № 6 имеет интервал пластичности, примерно равный интервалу пластичности у образцов № 3, 4, и одновременно высокие значения пенетрации и растяжимости при 25 °С (см. таблицу). Основными структурными образованиями у данного образца являются элементы гофрового типа, размер которых составляет примерно 10 мкм.

Компаундированные битумы, полученные на ОАО «Нафтан» смешением переокисленного битума и высоковязкого гудрона (образцы № 8 и 9), по сравнению с окисленными битумами (образцы № 3...5 и образец № 7) обладают более высокими температурами размягчения и более низкими температурами хрупкости. При этом растяжимость компаундированных битумов больше, чем у окисленных. Компаундированные битумы ОАО «Нафтан», в отличие от окисленных, характеризуются мелкогофрированной структурой (длина гофровых элементов составляет не более 10 мкм). На рисунке 1 представлены изображения поверхности окисленного и компаундированного битумов, произведенных ОАО «Нафтан».

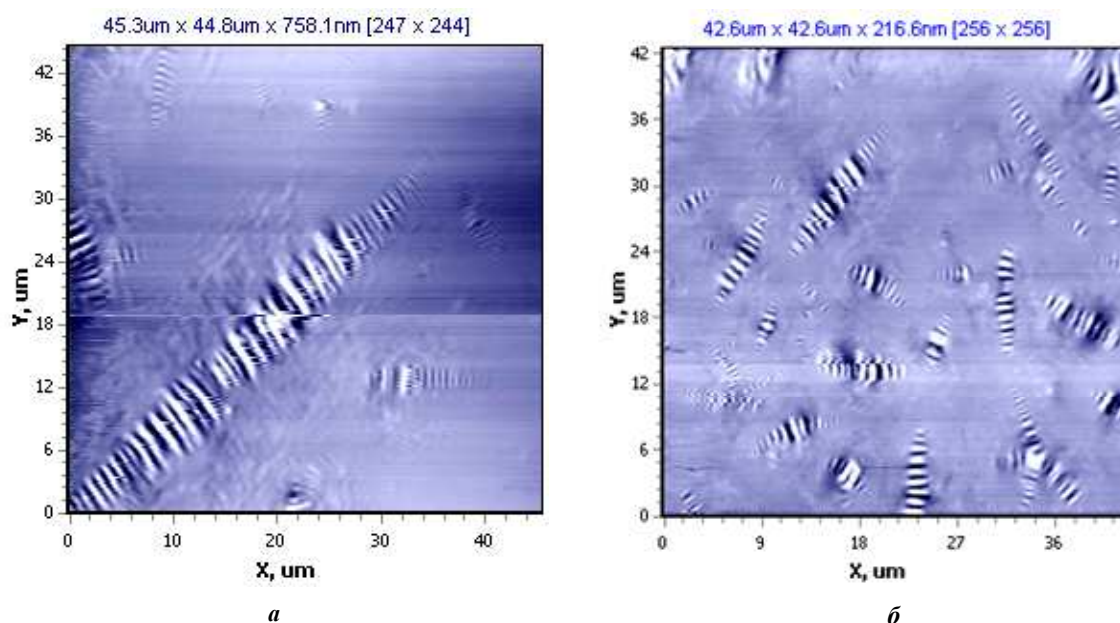


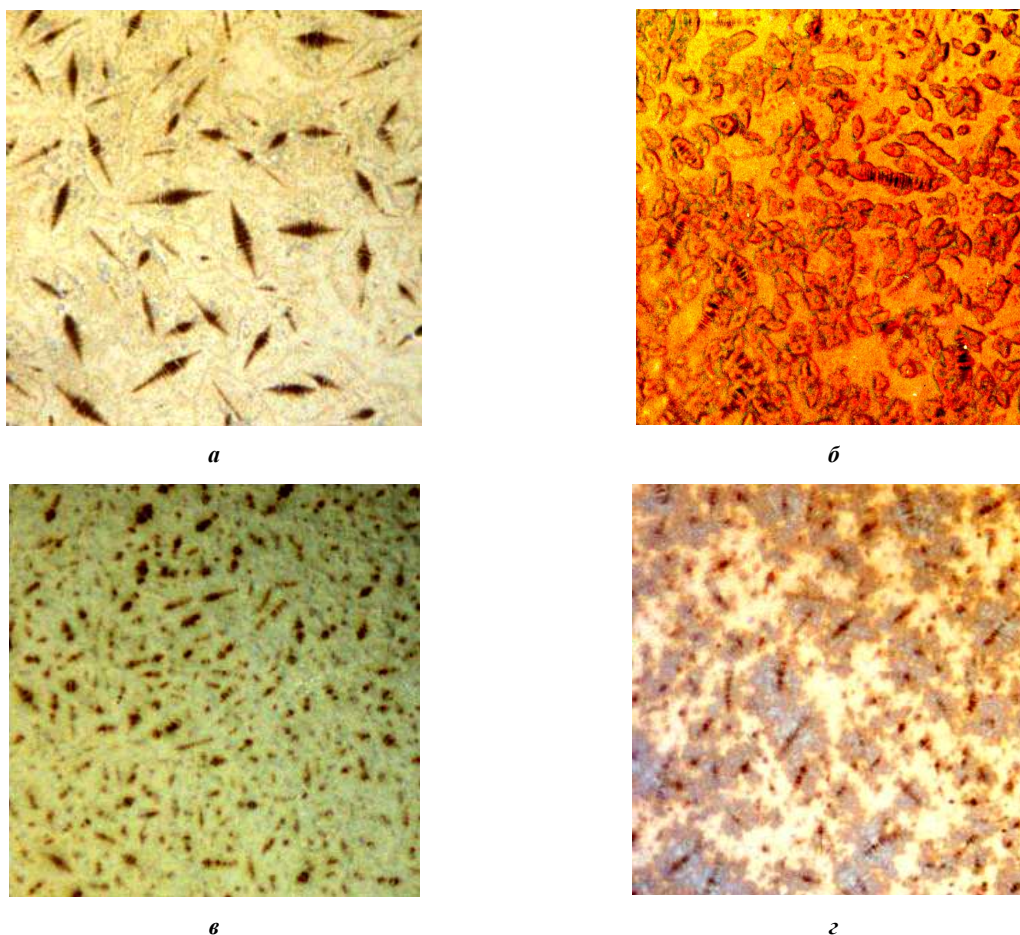
Рисунок 1 – Фрагменты поверхности окисленного (а) и компаундированного (б) битумов марки БНД 90/130 (образцы № 3 и 8 соответственно). Атомно-силовая микроскопия

В работе [20] структура остаточных битумов была отнесена к типу «золь», а структура окисленных и компаундированных дорожных битумов – к типу «золь-гель», так как она занимает промежуточное положение между свободнодисперсным и связнодисперсным состоянием. С точки зрения вязкостно-температурных свойств предпочтительной, по-видимому, является структура остаточных битумов. По данным работы [19], они обладают более пологой вязкостно-температурной кривой по сравнению с битумами гофрированной структуры (исследование зависимости вязкости от температуры проводилось для образцов с неразрушенной структурой, которая формировалась путём прогрева битумов на песчаной бане в течение 20 минут при 100 °С с последующим медленным охлаждением до комнатной температуры).

Поверхностный микрорельеф битумов чувствителен к вводимым в них добавкам, при этом изменение структуры битумов сопровождается изменением их свойств. Например, введение в битум № 3 ок-

сида кремния (2% масс.) приводит к формированию микрорельефа крупноглобулярного типа, представленного в основном элементами эллипсовидной формы (рис. 2, б), а для исходного образца № 3 при этих же условиях термодформационного травления (нагрев в течение 20 минут при 180 °С с последующим медленным охлаждением) характерно наличие крупных гофр и мелкозернистых глобул (рис. 2, а). При этом технические свойства битума с введением данной добавки изменяются следующим образом: температура размягчения увеличивается на один градус, пенетрация при 25 °С уменьшается со 130 до 83 единиц, растяжимость при 25 °С резко снижается с 68 до 14,3 см. Полученные результаты обусловлены, по-видимому, структурирующим влиянием добавки.

Добавка в дорожный битум БНД 90/130 парафина также существенно изменяет его поверхностный микрорельеф. При введении 5...10% масс. твёрдых парафиновых углеводородов почти вдвое уменьшается длина гофровых элементов. Одновременно увеличивается размер глобул, которые располагаются вокруг гофр (рис. 2, в и г), формируются мелкозернистые области вокруг гофр. Уменьшение размера гофр можно объяснить уменьшением растворяющей способности дисперсионной среды по отношению к дисперсной фазе. Это приводит к увеличению количества центров структурообразования и уменьшению размеров структурных образований асфальтосмолистых соединений. Изменение структуры оказало существенное влияние на свойства битума. Например, при введении в окисленный битум БНД 90/130, полученный в ОАО «Нафтан», 5% масс. твёрдых парафиновых углеводородов температура размягчения повысилась с 45 до 50 °С, пенетрация и растяжимость при 25 °С снизились соответственно с 95 до 81×0,1 мм и с 70 до 23 см.



а – исходный битум; **б** – битум с добавкой оксида кремния (2% масс.);
в и **г** – битум с добавкой твёрдых парафиновых углеводородов (5 и 10% масс. соответственно)

Рисунок 2 – Влияние добавок на структуру окисленного битума БНД 90/130 (ОАО «Нафтан»).
Оптическая микроскопия, ×200

Добавление сульфонатной присадки С-150 (в количестве 0,75% масс.) в битум БНД 90/130 способствует формированию зернистых областей вокруг гофровых элементов; температура размягчения для об-

разца с присадкой уменьшилась на один градус (с 43 до 42 °С), пенетрация увеличилась с 98 до 115×0,1 мм, растяжимость не изменилась (100 см). Экспериментально доказано, что введение этой добавки приводит к повышению термоокислительной стабильности дорожных битумов [21].

Ярко выраженное формирование околгофровых областей происходит также при добавке в битум БНД 90/130 стеариновой кислоты в количестве 4% масс. Введение стеариновой кислоты сопровождается изменением ряда свойств битума (на кривой дисперсности наблюдается минимум при концентрации 2,5% масс. и увеличение размеров дисперсных частиц при дальнейшем повышении концентрации кислоты; происходит уменьшение растяжимости и т.д.), которое связывается исследователями с формированием новых дисперсных частиц кислотного типа [22].

Закключение. Анализ структуры поверхностного микрорельефа и технических свойств дорожных битумов показал, что для данных продуктов предпочтительным является микрорельеф мелкогофрового (с гофраами длиной до 10 мкм) либо глобулярного типа (с изолированными глобулами, имеющими размер до 1 мкм).

Структура микрорельефа, представленная мелкими гофраами, характерна, как правило, для компандированных битумов, полученных путём смешения переокисленного битума и гудрона. Глобулярный микрорельеф с изолированными глобулами наблюдается у остаточных битумов. Данные битумы обладают большим интервалом пластичности, а также большей растяжимостью по сравнению с окисленными битумами крупногогофровой структуры, произведенными из гудрона лёгких нефтей.

Введение в состав битума добавок различной природы приводит к изменению структуры битума, которое сопровождается изменением свойств битумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веренько, В.А. Новые материалы в дорожном строительстве: учеб. пособие / В.А. Веренько. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 170 с.
2. Худякова, Т.С. Адгезионные свойства нефтяных битумов и способы их корректировки: Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность. Обзорная информация. Серия: Переработка нефти. Вып. № 3. Тематический обзор / Т.С. Худякова, Д.А. Розенталь, И.А. Машкова. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. – 19 с.
3. Сюняев, З.И. Нефтяные дисперсные системы / З.И. Сюняев, Р.З. Сафиева, Р.З. Сюняев. – М.: Химия, 1990. – 226 с.
4. Сафиева, Р.З. Физикохимия нефти. Физико-химические основы технологии переработки нефти / Р.З. Сафиева. – М.: Химия, 1998. – 448 с.
5. Колбановская, А.С. Дорожные битумы / А.С. Колбановская, В.В. Михайлов. – М.: Транспот, 1973. – 264 с.
6. Унгер, Ф.Г. Фундаментальные аспекты химии нефти. Природа смол и асфальтенов / Ф.Г. Унгер, Л.Н. Андреева. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд. РАН, 1995. – 192 с.
7. Апостолов, С.А. Научные основы производства битумов / С.А. Апостолов. – СПб.: С.-Петерб. гос. ун-т, 1999. – 168 с.
8. Ахметов, Б.Р. Некоторые особенности надмолекулярных структур в нефтяных средах / Б.Р. Ахметов, И.Н. Евдокимов, Н.Ю. Елисеев // Химия и технология топлив и масел. – 2002. – № 4. – С. 41–43.
9. Битумные материалы. Асфальты, смолы, пеки / Ч. Макк [и др.]; под общ. ред. А.Дж. Хойберга. – М.: Химия, 1974. – 248 с.
10. Колбановская, А.С. Пути направленного структурообразования дорожных битумов / А.С. Колбановская // Сб. науч. тр.; Всесоюз. дорож. НИИ. – М., 1971. – Вып. 49: Структурообразование, методы испытаний и улучшение технологии получения битумов. Труды СоюздорНИИ. – С. 21–29.
11. Печёный, Б.Г. Битумы и битумные композиции / Б.Г. Печёный. – М.: Химия, 1990. – 256 с.
12. Печёный, Б.Г. О формировании равновесных структур в битумах / Б.Г. Печёный, О.И. Кузнецов // Химия и технология топлив и масел. – 1990. – № 7. – С. 32–34.
13. Рациональные направления производства дорожных битумов / Ю.А. Кутын [и др.] // Башкирский химический журнал. – 1996. – Т. 3, № 3. – С. 27–32.
14. Клеонский, И.Г. Получение нефтяного дорожного битума улучшенного качества / И.Г. Клеонский, Э.М. Игнатов // Химия и технология топлив и масел. – 1991. – № 12. – С. 5–6.
15. Испытания неокисленных дорожных битумов в составе асфальтобетонных смесей / Ю.А. Кутын [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1999. – № 4. – С. 17–18.

16. О некоторых особенностях поведения дорожных битумов в составе асфальтобетона / Ю.А. Кутын [и др.] // Проблемы производства и применения нефтяных битумов и композитов на битумной основе: материалы межотраслевого совещания, Саратов, 28–29 марта 2000 г.: в 2 т. / ОАО «Саратовский НПЗ», Ассоциация нефтепереработчиков и нефтехимиков. – М., 2000. – Т. 1. – С. 20–27.
17. Суховило, Н.П. Изучение надмолекулярной структуры битумов / Н.П. Суховило // Материалы XXXII студенческой научной конференции ПГУ: тез. докл., Новополоцк, 20–30 апр. 2003 г. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2003. – С. 262–265.
18. Суховило, Н.П. Изучение надмолекулярной структуры дорожных битумов / Н.П. Суховило, С.М. Ткачёв, Н.В. Ощепкова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2004. – № 4. – С. 62–68.
19. Ткачёв, С.М. Взаимосвязь вязкости и структуры нефтяных битумов / С.М. Ткачёв, Н.П. Суховило // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2006. – № 10. – С. 158–163.
20. Суховило, Н.П. Влияние способа получения на мезоструктуру нефтяных битумов / Н.П. Суховило, С.М. Ткачёв, Н.В. Ощепкова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2006. – № 10. – С. 164–169.
21. Кульпо, М.М. Получение битумов с повышенной термоокислительной стабильностью / М.М. Кульпо // Новейшие достижения в области импортозамещения в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 26–28 ноября 2003 г. / Беларус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2003. – С. 213–215.
22. Худович, И.М. Изменение физико-химических свойств дорожного битума с увеличением его кислотности / И.М. Худович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2004. – № 6. – С. 53–56.

Поступила 05.03.2016

THE PECULIARITIES OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF ROAD BITUMEN, OBTAINED BY VARIOUS TECHNOLOGIES

N. SUKHOVILO, S. TKACHYOV

The interrelation of surface microrelief structure has been linked to properties of road bitumen, obtained by various technologies. It is shown that structure represented by single or small globule corrugations (up to 10 μm) is preferred. The structure is characteristic of residual and compound bitumen; those bitumen have greater interval of plasticity and greater extensibility. It is established that microrelief of bitumen is responsive to additives being introduced, herein change between structure is accompanied by a change in their properties.

Keywords: road bitumen, structure, surface microrelief, softening point, brittleness point, penetration, ductility.

УДК 547.652:541.123.3

**СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАСТВОРЯЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
УГЛЕВОДОРОДОВ И СПИРТОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К НАФТАЛИНУ**

канд. хим. наук, доц. **С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ**; канд. техн. наук **Ю.А. БУЛАВКА**; **Е.В. КАЗАК**
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты оценки растворяющей способности углеводородов и спиртов по отношению к конденсированному ароматическому углеводороду – нафталину. Установлены зависимости изменения растворимости нафталина от молярной массы растворителя: углеводорода и спирта, их структуры (парафиновые, изопарафиновые, наftenовые, ароматические углеводороды и спирты), температуры растворения. Молярная масса углеводорода и спирта оказывает непосредственное влияние на растворяющую способность нафталина. Углеводороды по способности повышать растворяющую способность нафталина можно расположить в следующий ряд: парафиновые углеводороды разветвленного строения < парафиновые углеводороды линейного строения < наftenовые углеводороды < ароматические углеводороды.

Ключевые слова: оценка растворяющей способности, углеводороды, спирты, нафталин.

Введение. Одним из ключевых направлений в химии углеводородов является установление закономерностей их взаимодействия с молекулами растворителей. В настоящее время установлен ряд правил о растворимости углеводородов, но они не обладают универсальностью, не свободны от различного рода исключений и потому носят в большинстве случаев качественный характер. Интерес к химии растворения нафталина вызван как прикладной, так и фундаментальной значимостью этой проблемы. Кристаллический нафталин является ценным сырьем для химической промышленности, используется для синтеза моно- и полисульфокислот, нитрозамещенных и многочисленных продуктов их дальнейшей переработки, в производстве фталевого ангидрида, применяется для получения красителей и взрывчатых веществ, в медицине и др. [1].

При комнатной температуре для нафталина ($C_{10}H_8$) характерна кристаллическая структура (вещество структурного класса $P2_1/c$), имеет вид блестящих белых летучих кристаллов с характерным запахом [1; 2]. Молекула нафталина – это система, состоящая из двух конденсированных в ортоположениях бензольных колец, имеющая плоское строение с равномерным распределением π -электронной плотности. В молекуле нафталина 10 π -электронов распределены симметрично между ядрами молекулы – оба ароматические [2]. В твердом состоянии молекулы нафталина образуют моноклинную решётку, длины различных связей C–C, C–H и другие в кристаллическом нафталине приведены на рисунке 1 а, б вдоль различных кристаллографических осей. Молекулярные агрегаты представляют собой «паркетные» слои, параллельное наложение которых приводит к образованию пластинчатых кристаллов (рис. 1, в). В жидком состоянии «паркетные» слои молекул нафталина в начале плавления смещаются из узлов решётки, сохраняя более сильные связи между параллельными группировками, а при дальнейшем нагревании с увеличением «свободного» объёма и подвижности молекулы нафталина теряют «наследственную» структуру по отношению друг к другу [2].

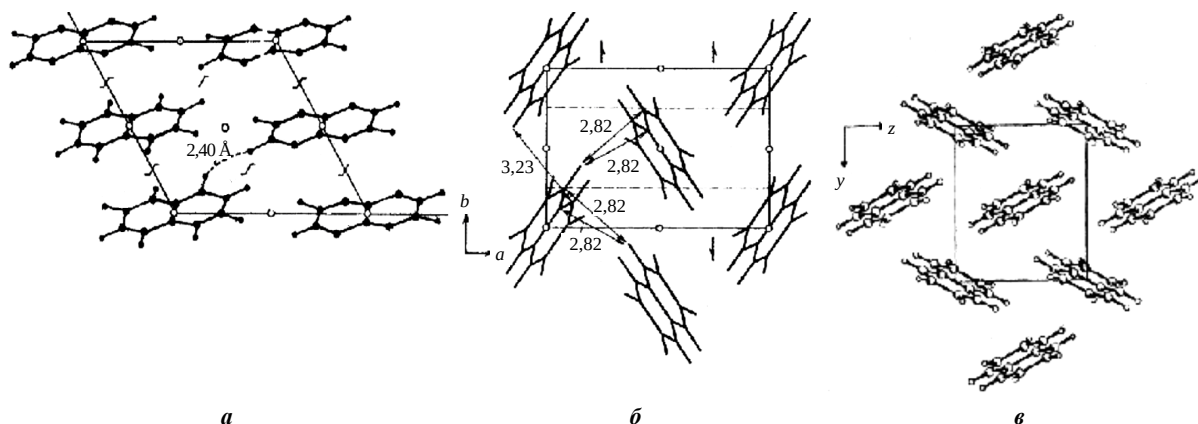


Рисунок 1 – Структура нафталина (а, б) и «паркетный» слой в кристаллах нафталина (в)

Исследования молекулярных кристаллов нафталина при высоком давлении выявили характерные особенности этих кристаллов, связанные с Ван-дер-Ваальсовским межмолекулярным и ковалентным

внутримолекулярным взаимодействием [3]. Большая сжимаемость в начальном диапазоне давлений, быстро спадающая с ростом давления, обусловлена Ван-дер-Ваальсовским взаимодействием и типична для органических кристаллов [4].

Методы исследований. С целью расширения данных по физико-химическим характеристикам нафталина, в частности источников [5–7], выявлены зависимости изменения растворимости нафталина в различных спиртах и углеводородах в интервале температур от 20 до 70 °С. Растворимость определяли по общепринятой методике: в круглодонную трехгорлую колбу ёмкостью 100 мл, снабжённую мешалкой, обратным холодильником, капельной воронкой и термометром, засыпали навеску, добавляли определенное количество растворителя, смесь при перемешивании нагревали на водяной бане до требуемой температуры. В случае нерастворения нафталина добавляли растворитель порционно. Смесь выдерживали в течение 10 минут.

Результаты и их обсуждение. Зависимость растворимости нафталина в углеводородах и спиртах (X , % масс.) от температуры (t , °С), приведенная на рисунке 2, носит экспоненциальный характер (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9901...0,9995$), кривые растворимости без изломов, что характерно для процессов физического растворения. Нелинейная зависимость растворимости нафталина при росте температуры может быть обусловлена ростом энергии теплового движения молекул, в то время как энергия межмолекулярного взаимодействия изменяется незначительно.

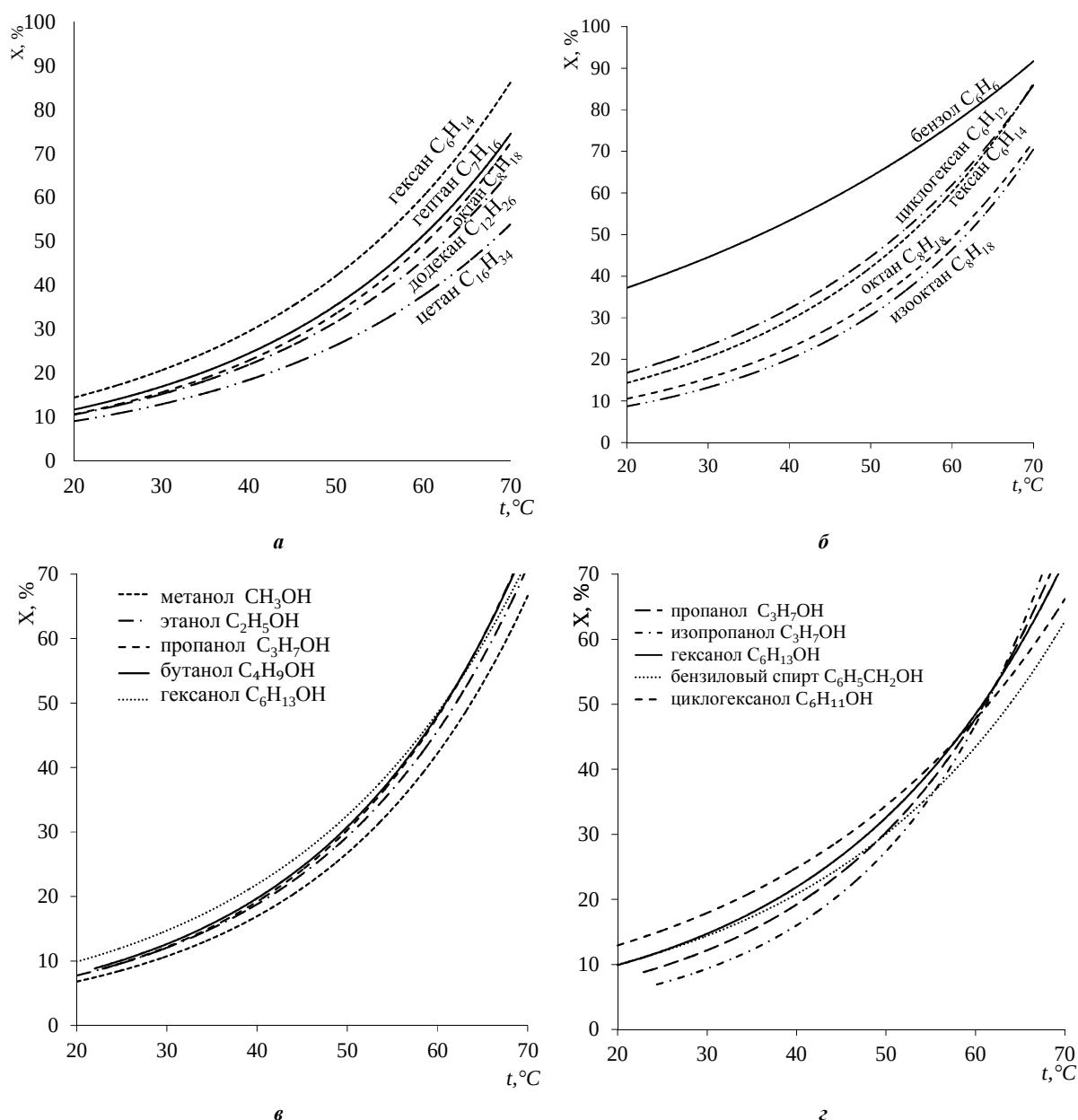


Рисунок 2 – Зависимость растворимости нафталина от температуры

Подбор приемлемых температурных условий наряду с выбором подходящего растворителя являются главными факторами, способствующими достижению высоких концентраций растворенного вещества. Рост растворимости при повышении температуры привычен для неэлектролитов в неполярных и малополярных растворителях. При температуре выше 70 °С и приближении к температуре плавления нафталина происходит гомогенизация раствора.

Согласно молекулярной теории растворов [8], состояние системы определяется, с одной стороны, межмолекулярным взаимодействием, обуславливающим потенциальную энергию молекул, которая способствует упорядочению молекул в системе, с другой – тепловым движением, которое определяет их кинетическую энергию и оказывает разупорядочивающее действие на молекулы в растворе. Притяжение между молекулами веществ создается за счет физического взаимодействия, обусловленного силами Ван-дер-Ваальса (ориентационное, индукционное, дисперсионное взаимодействие), и химического взаимодействия водородных и π -связей [9; 10]. Бензольное кольцо ароматических соединений рассматривают как специфический центр межмолекулярного взаимодействия.

При растворении нафталина в различных углеводородах и спиртах могут в той или иной степени проявляться все составляющие силы межмолекулярного взаимодействия. Сравнительный анализ взаимной растворимости позволил установить следующие зависимости:

1) растворимость нафталина в ряду гексан, гептан, октан, декан, додекан, цетан снижается (рис. 2, а). Исходя из этого можно утверждать, что в предельных углеводородах растворимость нафталина уменьшается с ростом длины цепи в исследуемых условиях. Вероятно, чем большую длину имеет молекула насыщенного алифатического углеводорода, тем большие стерические препятствия она окажет при образовании межмолекулярных взаимодействий – аддитивных дисперсионных сил с молекулами нафталина. Процесс растворения нафталина в различных углеводородах можно отнести к физическому растворению, при котором происходит разрыв и образование только межмолекулярных связей, свободная энергия Гиббса системы понижается ($\Delta G_{\text{раств}} < 0$ ($\Delta G_{\text{раств}} = \Delta H_{\text{раств}} - T\Delta S_{\text{раств}}$)) в большей степени за счет увеличения энтропийного фактора ($T\Delta S_{\text{раств}}$), поскольку тепловой эффект процесса растворения нафталина в различных углеводородах практически равен нулю ($\Delta H_{\text{раств}} \approx 0$);

2) гидроксильная группа, вводимая в молекулу углеводорода, ухудшает растворимость нафталина (на примере: гексан и гексанол, бензол и бензиловый спирт), что проиллюстрировано рисунками 2, в, г. Это, вероятно, обусловлено необходимостью разрушения прочных линейных и циклических ассоциатов (трехмерной цепочечно-слоистой структуры), характерных для предельных одноатомных спиртов. Молекулы спиртов способны образовывать водородные связи между собой, однако более слабые с молекулами нафталина. В отличие от углеводородов, для одноатомных спиртов характерно повышение растворимости нафталина в спирте с увеличением его молярной массы (в ряду: метанол, этанол, пропанол, бутанол, пентанол, гексанол, октанол) (см. рис. 2, в), что, возможно, связано с понижением степени ассоциации при увеличении молярной массы спирта и усилением роли донорно-акцепторного взаимодействия, сопровождаемого смещением π -электронов нафталина при взаимодействии с электрофильной группой спирта, и образованием слабого комплекса, кроме того химическая природа растворителя все более приближается к химической природе растворенного вещества;

3) в углеводородах с разветвленной боковой цепью растворимость нафталина ниже, чем в веществах нормального строения, и снижается с ростом числа разветвлений. Это правило относится как к углеводородам (на примере: октан и изоктан) (рис. 2, б), так и к спиртам (бутанол, изобутанол, третбутиловый спирт; пропанол и изопропанол) (см. рис. 2, г), что очевидно связано с тем, что объемный малополярный алкильный фрагмент имеет значительный размер и практически неспособен к специфическим взаимодействиям;

4) в циклических углеводородах нафталин растворяется лучше, чем в углеводородах с открытой цепью (на примере: гексан и циклогексан) (рис. 2, б), аналогичная зависимость прослеживается и в спиртах, растворимость нафталина в гексаноле ниже, чем в циклогексиловом спирте (рис. 2, г), что вероятно, обусловлено более плотной упаковкой, меньшими стерическими препятствиями и, как следствие, более сильным межмолекулярным взаимодействием циклических структур с молекулами нафталина, чем у алканов;

5) растворимость нафталина в углеводородах с появлением в их молекуле ароматических колец и ростом их числа увеличивается (на примере: гексан и бензол, декалин и тетралин) (см. рис. 2, б). Данный процесс растворения следует рассматривать преимущественно с позиции подобия: «подобное растворяет подобное», поскольку энергии межмолекулярного притяжения компонентов близки между собой. Между молекулами нафталина и ароматического растворителя присутствует взаимодействие более сильное, чем обеспечиваемое силами Ван-дер-Ваальса, которое может быть вызвано перекрыванием р-орбиталей между нафталиновыми и бензольными кольцами растворителя, приводящим к перераспределению электронной плотности и образованию π -комплексов. В ароматических углеводородах нафталин растворяется лучше, чем в нафтенных углеводородах (на примере: бензола и циклогексана), о чем свидетельствуют данные рисунка 2, б. Замечено также, что при появлении в бензольном кольце алкильных заместителей

растворимость нафталина снижается (на примере: бензол>толуол>этилбензол>ксилолы). При появлении гидроксильной группы в боковой цепи ароматического кольца растворимость нафталина уменьшается (на примере: гексанол и бензиловый спирт).

Таким образом, поведение нафталина носит двойственный характер – при контакте с углеводородами ведет себя как неполярное соединение и благодаря близким значениям энергии межмолекулярного притяжения легко смешивается с ними. В то же время снижение растворяющей способности происходит при контакте с функциональной группой (в частности, гидроксильной), несмотря на то, что нафталин поляризуется с образованием индуцированного диполя, который взаимодействует с диполями спиртов.

Закключение. Нафталин хуже растворим в полярных веществах, (в частности, в одноатомных спиртах), чем в углеводородах; растворимость нафталина увеличивается в ряду: парафиновые углеводороды разветвленного строения<парафиновые углеводороды нормального (линейного) строения<циклопарафиновые углеводороды<ароматические углеводороды. Процесс растворения является ключевым при выделении и очистке нафталина, во многом определяя итоговую цену продукта. Полученные экспериментальные данные по взаимной растворимости нафталина в спиртах и углеводородах могут быть рекомендованы для нахождения оптимальных условий экстракционного разделения нафталинсодержащей фракции тяжелой смолы пиролиза нефтяного сырья и каменноугольной смолы, что, в свою очередь, может снизить затраты на промышленное производство нафталина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дональдсон, Н. Химия и технология соединений нафталинового ряда / Н. Дональдсон. – М.: Госхимиздат, 1963. – 532 с.
2. Александров, В.Д. Анализ термодинамических и кинетических параметров равновесной и неравновесно-взрывной кристаллизации бензола и нафталина / В.Д. Александров, В.А. Постников, Н.В. Щебетовская // Вісник Донецького національного університету. Сер. А: Природничі науки. – 2009. – С. 55–61.
3. Samara, G.A. Effect of Pressure on the Resistance of Pyrolytic Graphite / G.A. Samara, H.G. Drickamer // J. Chem. Phys. – 1962. – № 37. – P. 474.
4. Vaidya, S.N. Melting curves of the potassium halides at hmit pressures / S.N. Vaidya, G.C. Kennedy // J. Chem. Phys. – 1971. – № 55. – P. 987.
5. Коган, В.Б. Справочник по растворимости: в 3-х т. / В.Б. Коган, В.М. Фридман, В.В. Кафаров; Акад. наук СССР. Всесоюз. ин-т науч.-техн. информ. – М.–Л.: Изд-во Акад. наук СССР, [Ленингр. отд-ние], 1962. – Т. 1: Бинарные системы, кн. 2. – 1961 с.
6. Лещев, С.М. Сравнительная оценка сольватирующей способности растворителей различной природы по отношению к конденсированным ароматическим углеводородам / С.М. Лещев, А.В. Синькевич // Журнал прикладной химии. – СПб.: С.-Петербург. издательско-книготорговая фирма «Наука», 2003. – Т. 76, № 9. – С. 1522–1527.
7. Разделение углеводородов с использованием селективных растворителей / Г.И. Биттрих [и др.]. – Л.: Химия, 1987. – 192 с.
8. Шахпаронов, М.И. Введение в молекулярную теорию растворов / М.И. Шахпаронов. – М.: Гостоптехиздат, 1956. – 507 с.
9. Коган, В.Б. Азеотропная и экстрактивная перегонка / В.Б. Коган. – М.: Химия, 1971. – 430 с.
10. Черножуков, Н.И. Технология переработки нефти и газа / Н.И. Черножуков. – М.: Химия, 1978. – 423 с.

Поступила 04.02.2016

COMPARATIVE EVALUATION OF THE SOLVATING POWER OF HYDROCARBONS AND ALCOHOLS TOWARDS NAPHTHALENE

S. YAKUBOUSKI, YU. BULAUKA, YA. KAZAK

The evaluation results of the solvating power of hydrocarbons and alcohols towards condensed aromatic hydrocarbon – naphthalene – were presented. The dependence of the solubility changes of naphthalene on the molar mass of the solvent was determined: hydrocarbon and alcohol, their structure (paraffinic, isoparaffinic, naphthenic, aromatic hydrocarbons and alcohols), dissolution temperatures. The molar mass of hydrocarbon and alcohol has a direct impact on the solubility power of naphthalene. Hydrocarbons in their capacity to increase the solubility power of naphthalene may be arranged in the following order: paraffinic hydrocarbons of the branched structure<paraffinic hydrocarbons of the linear structure<naphthenic hydrocarbons<aromatic hydrocarbons.

Keywords: solvent ability, hydrocarbons, alcohols, naphthalene, polar substances.

УДК 54.084

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЦВЕТОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СПИРТОРАСТВОРИМЫХ КРАСИТЕЛЕЙ

д-р хим. наук М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ; О.И. МАЕВСКАЯ
(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск)

Исследуется возможность использования метода цветометрии в системах HSB, RGB, Lab, CMYK для контроля за концентрацией спиртовых растворов метилового красного, бриллиантового зеленого и бромфенолового синего, а также для анализа концентрации смешанного красителя. Концентрация исследуемых красителей изменялась в пределах 0,1...1 мг/мл. В качестве носителя цвета использована фильтровальная бумага типа «белая лента», на которую предварительно наносился исследуемый раствор. Получение цветометрических характеристик осуществлялось с использованием графического редактора Photoshop с предварительно размытым изображением. Связь между концентрацией красителей и цветометрическими параметрами определялась посредством установления регрессионной зависимости между ними. Коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными данными составил 0,80...0,99. Показано, что система RGB обладает определенными преимуществами среди используемых цветометрических систем. При исследовании определения концентраций смешанного красителя использовалась калибровка по смеси красителей. Точность определения составляет около 10% отн.

Ключевые слова: цветометрия, контроль за концентрацией растворов, цветометрические характеристики, регрессионная зависимость, коэффициент корреляции, калибровка.

Введение. За последние годы резко возрос интерес к методам цветометрии, прежде всего к методу количественной оценки концентрации веществ. Меньшее число работ посвящено комплексообразованию и кислотно-основному равновесию. Обзоры в этой области знаний представлены в [1; 2]. Число работ, отражающих данный метод анализа, возросло. Большинство работ относится к анализу одного компонента в растворе, в то время как количество работ по определению исследуемых компонентов в смеси чрезвычайно мало [1; 4]. При этом суть определения веществ при их совместном определении до конца не раскрывается, а лишь констатируется, что точность метода невысокая. В большинстве работ приводятся примеры того, что коэффициенты экстинкции веществ, определяемых спектрофотометрически, на 1...2, а иногда и три порядка ниже, чем коэффициенты уравнений, связывающие координаты цвета с содержанием определяемых веществ. Однако непонятно, каким образом сравнивались величины, измеренные в разных единицах. В качестве аппаратной базы используются спектрофотометры, имеющие соответствующее программное обеспечение (например, СФ-56 или специализированные спектрофотометры типа фотоэлектроколориметра «Спектротон»). Для оценки выходных характеристик применяют различные цветовые системы: X, Y, Z – цветовая модель, заданная в строгом математическом смысле организацией CIE (International Commission on Illumination – Международная комиссия по освещению) в 1931 году; Red, Green, Blue – красный, зелёный, синий – аддитивная цветовая модель для цветовоспроизведения; CMYK – голубой, желтый, пурпурный, черный – субтрактивная цветовая модель для цветовоспроизведения в полиграфии; HSB – тон, насыщенность, яркость; Lab – яркость, цветовая гамма от зеленого до пурпурного, цветовая гамма от голубого до желтого. Кроме них используют понятие цветовое различие, белизна, желтизна и ряд других.

Постановка задачи. Как следует из вышесказанного, для получения тех или иных цветометрических характеристик требуется специальная аппаратура. Целью данной работы является попытка получить и использовать цветометрические характеристики без применения спектрофотометрического оборудования. В качестве объекта исследования использованы спиртовые растворы метилового красного, бриллиантового зеленого и бромфенолового синего с концентрацией в пределах 0,1...1 мг/мл.

Экспериментальная часть. В качестве носителя цвета применяли фильтровальную бумагу «белая лента» (ГОСТ 12026-76). Для сканирования образцов использовали сканер HP Laser Jet V 1132 MFP. Разрешение 200 dpi. Раствор красителя или смеси трех красителей различной концентрации наносили пипеткой на середину фильтровальной бумаги размером 11×11 см, примерно в центр. После того как фильтровальная бумага впитает раствор, ее высушивали в токе холодного воздуха от тепловентилятора. Время сушки составляло 5...10 мин. Полученный образец сканировали на фоне белой бумаги. Файл в формате JPEG открывали в растровом редакторе Adobe Photoshop CC. Полученный скан (пятно красителя) обрабатывали инструментом магнитное лассо и размывали по среднему. Образец изображения представлен на рисунках 1 и 2. Затем при помощи вкладки «Палитра цветов» определяли цветовые координаты в системах HSB, RGB, Lab, CMYK. Сканирование проводили с двух сторон образца. В качестве итогового показателя использовали арифметическое среднее. Для оценки воспроизводимости коэффициент вариации случайной величины вычисляли как отношение среднеквадратичного отклонения к среднему значению в процентах для четырех параллельных определений.

Результаты работы и их обсуждение. Для модели CMYK (растворы индивидуальных красителей 0,1...1 мг/л) получены следующие значения коэффициентов вариации: для C – 1,0%, M – 1%, Y – 2%. Для модели RGB: R – 1,5%, G – 1,5%, B – 3%. Для модели HSB: H – 4%, S – 4%, B – 2,5%. Для модели Lab: L – 2,5%, a – 5,5%, b – 5 %.

Для экспериментально полученных значений были рассчитаны соответствующие регрессионные уравнения первого порядка.



Рисунок 1 – Сканированный образец изображения раствора 1 мг/мл метилового красного до размытия **Рисунок 2 – Сканированный образец изображения раствора 1 мг/мл метилового красного после размытия**

Для растворов метилового красного (0,1...1 мг/л) установлено, что коэффициенты корреляции для системы CMYK, ошибки определения и уравнения регрессии равны соответственно:

R-squared = 79,577 percent
 R-squared (adjusted for d. f.) = 65,9616 percent
 Standard Error of Est. = 0,0184879
 $C = 0,0340252 - 0,00181862 * M + 0,00292127 * Y$
 P Value – 0,0923

Для системы RGB:
 R-squared = 96,2259 percent
 R-squared (adjusted for d. f.) = 90,5648 percent
 Standard Error of Est. = 0,00973371
 $C = 1,32826 - 0,00420228 * R - 0,00533493 * G + 0,00392721 * B$
 P Value – 0,0561

Для системы HSB:
 R-squared = 89,2681 percent
 R-squared (adjusted for d. f.) = 73,1703 percent
 Standard Error of Est. = 0,0164139
 $C = 0,940061 - 0,0000354615 * H - 0,000416323 * S - 0,00912835 * B$
 P Value – 0,1566

Для системы Lab:
 P Value – 0,0017
 R-squared = 96,2751 percent
 R-squared (adjusted for d. f.) = 90,6877 percent
 Standard Error of Est. = 0,00967009
 $C = 1,65503 - 0,0180886 * L - 0,000337614 * a - 0,00821741 * b$
 P Value – 0,0553

Для растворов бриллиантового зеленого (0,1...1 мг/л) для системы CMYK:
 R-squared = 99,4009 percent
 R-squared (adjusted for d. f.) = 98,5022 percent
 Standard Error of Est. = 0 00387816
 $C = -0,00551929 - 0,00061975 * C + 0,00072195 * M + 0,00334185 * Y$
 P Value-0,009

Для системы RGB:
 R-squared = 99,2349 percent
 R-squared (adjusted for d. f.) = 98 0873 percent
 Standard Error of Est. = 0,0043825
 $C = 0,278002 - 0,0000365414 * R - 0,000980231 * G - 0,0000416923 * B$
 P Value – 0,0115

Для системы HSB:

R-squared = 99,3818 percent

R-squared (adjusted for d. f.) = 98,4546 percent

Standard Error of Est. = 0,00393934

$C = 0,671407 - 0,00250137 \cdot H + 0,000170646 \cdot s - 0,00224697 \cdot b$

P Value – 0,0093

Для системы Lab:

R-squared = 99,3854 percent

R-squared (adjusted for d. f.) = 98,4635 percent

Standard Error of Est. = 0,00392801

$C = 0,285638 - 0,00281254 \cdot L + 0,000103509 \cdot a + 0,000960418 \cdot b$

P Value – 0,0092

Близкие результаты были получены и для растворов бромфенолового синего.

Анализ смеси веществ в растворе, как уже было указано выше, вызывает определенные трудности. При сравнении со спектрофотометрическим методом анализа метод цветотрии фактически ограничен возможностью определения только трех компонентов, так как основные цветотрические показатели определяются тремя координатами. В то же время спектрофотометрический анализ таких ограничений не имеет. Правда, на практике при помощи спектрофотометрического анализа определяют не более трех компонентов, что связано с получением плохо обусловленных систем уравнений [5; 6].

Предварительные исследования определения концентрации смеси веществ, полученных по индивидуальным калибровкам, к успеху не привели. Поэтому мы предложили использовать следующую стратегию эксперимента. В ее основе лежит калибровка компонентов, выполненная непосредственно по смесям веществ с известными концентрациями. В отличие от достаточно формальной калибровки, которую используют в спектрофотометрии, мы использовали калибровку, в которой количество смесей значительно превышает количество определяемых компонентов. Преимущество такой калибровки заключается в том, что коэффициенты, связывающие концентрации веществ с определяемыми параметрами, анализируются при их совместном использовании, что, возможно, помогает учитывать вероятное «взаимовлияние» исследуемых компонентов. В таблице приведен фрагмент такой калибровки.

Фрагмент таблицы определения цветовых характеристик для трех красителей

Концентрация красителей, мг/л			Координаты цвета для различных систем												
красный	синий	зеленый	H	S	B	R	G	B	L	a	b	C	M	Y	K
0,330	0,330	0,330	10	10	61	154	142	139	61	6,5	4	38	40	41	1,5
0,250	0,250	0,500	187	18	66	139	166	170	66	−14	−6	52	22	31	0
0,200	0,400	0,400	198	6	64	153	159	162	66	−2,5	−2,2	42	30	32	0
0,910	0,045	0,045	9	32	78	198	144	135	68	27	17	16	47	42	0
0,400	0,200	0,4	162	4	63	154	160	158	65	−3,5	0	42	29	34	0
0,680	0,167	0,167	13,5	18	71	181	156	149	68	12	9	25	36	37	0
0,200	0,200	0,600	181	24	69	134	176	177	68	−21	−7	57	16	31	
0,142	0,428	0,428	191	20	73	148	179	186	70	−15	−9	47	17	24	0
0,167	0,167	0,680	190	35	71	120	173	182	66	−25	−14	66	16	28	0

В качестве расчетной была предложена модель вида

$$Y = a + bC_1 + cC_2 + dC_3 + eC_1C_2C_3,$$

где Y – координата цвета одной из систем; C_1, C_2, C_3 – концентрация красителей; a, b, c, d – регрессионные коэффициенты.

При исследовании данной модели с использованием различных систем оказалось, что наиболее подходящими являются системы RGB, CMYK, Lab, а наименее подходящей HSB.

Для решения полученных нелинейных систем использовались программные продукты типа SPSS и Statgraphics Pro, которые имеют соответствующие программы для расчета коэффициентов нелинейной регрессии. Для системы полученные модели имеют следующий вид:

$$R = 184,295 + 19,492C_1 + 15,5104C_2 - 93,1455C_3 - 199,982C_1C_2C_3;$$

$$G = -285,275 + 428,285C_1 + 413,807C_2 + 478,075C_3 - 29,5751C_1C_2C_3;$$

$$B = -392,862 + 524,028C_1 + 535,004C_2 + 599,654C_3 - 216,313C_1C_2C_3.$$

Коэффициенты корреляции между опытными и расчетными данными для этих показателей соответственно равны: 98,9; 84,39; 93,17.

Проверка на верификацию полученных данных осуществлялась на двух искусственных смесях путем решения системы нелинейных уравнений в программе Excel-вкладка Данные-Поиск решения. Общая суммарная ошибка, как правило, не превышала 10% отн. Качество определения можно повысить, осуществляя итерации, которые включают калибровку с предварительно определяемой концентрацией исследуемой смеси веществ, пересчет калибровочных зависимостей, добиваясь сходимости.

Выводы. Применение цветиметрических характеристик позволяет с достаточно высокой точностью определить их концентрации при использовании систем HSB, RGB, Lab, CMYK. Так как квадрат коэффициента корреляции для системы RGB имеет наибольшее значение, то данная цветовая система наиболее пригодна для определения концентрации индивидуальных красителей. Для нахождения концентрации веществ в смеси предложена методика, которая заключается в прямой калибровке на смесях веществ с известной концентрацией. Не претендуя на высокую точность, данная методика может быть использована в лабораторных практикумах для аналитической химии, так как не требует использования специального и достаточно дорогостоящего оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ тенденций развития метода химической цветиметрии (Обзор) / А.Н. Чеботарев [и др.] // Методы и объекты химического анализа. – 2014. – № 9. – С. 4–11.
2. Иванов, В.М. Химическая цветиметрия. Возможности метода, области применения и перспективы / В.М. Иванов, О.В. Кузнецова // Успехи химии. – 2001. – Т. 70, № 5. – С. 411–428.
3. Химченко, С.В. Раздельное RGB-цветиметрическое определение Fe(III) и Co (II) в их смеси на пенополиуретане / С.В. Химченко, Л.П. Экспериандова, Е.Н. Лемишко // Методы и объекты химического анализа. – 2012. – Т. 7, № 3. – С. 153–157.
4. Раздельное сорбционно-спектроскопическое определение Pb(II), Mn(II), Co(II), Ni(II), Cd(II), Cu(II), Zn(II) в их смеси с использованием реагентной индикаторной бумаги / Е.А. Решетняк [и др.] // Вісник Харк. нац. ун-ту. – 2013. – № 1085. Хімія. Вип. 22(45). – С. 210–219.
5. Берштейн, И.Я. Спектрофотометрический анализ в органической химии / И.Я. Берштейн, Ю.Л. Каминский. – Л.: Химия, 1986. – 200 с.
6. Корнейчик, Т.В. Определение гексоз, пентоз и уроновых кислот с о-толуидиновым реагентом / Т.В. Корнейчик, Л.А. Борисовская, М.А. Зильберглеит // Химия древесины. – 1986. – № 5. – С. 42–45.

Поступила 04.01.2016

THE COLORIMETRIC METHOD FOR CONTROL OF CONCENTRATION OF ALCOHOL-SOLUBLE DYES

M. ZILBERGLEIT, O. MAEVSKAYA

The possibility of use of a method of a colorimetry (systems HSB, RGB, Lab, CMYK) for control of concentration of spirit solutions of methyl red, diamond green and bromfenolicovy blue is investigated. Besides applicability of this method for the analysis behind of concentration of mixture dye is investigated. Concentration of the studied dyes was changed 0,1...1 mg/ml. As the carrier of color filter paper like of type «white ribbon» on which the studied solution was applied previously is used as the carrier. Receiving of the colormetric characteristics was carried out with use of the graphic Photoshop editor with previously washed away image. Communication between concentration of dyes and colormetric parameters was defined by means of establishment of regressive dependence between them. The correlation coefficient between experimental and settlement data made 0,80...0,99. It is obvious that the RGB system has certain advantages between the used colorimetric systems. At research of determination of concentration of mixture dye calibration on mixture of dyes was used. Accuracy of definition makes about 10%.

Keywords: colorimetry, control of concentration of spirit, colormetric characteristics, regressive dependence, correlation coefficient, calibration.

УДК 66.013.8

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ,
СВЯЗАННЫХ С ОХРАНОЙ ТРУДА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ****д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; В.А. ДРОНЧЕНКО**
(Полоцкий государственный университет)

Анализируется вопрос изменяющихся соотношений затрат на материалы, энергию, заработную плату и появления новых технических решений, требующий периодического пересмотра результатов оптимизации. Предложен способ выбора и обоснования технических решений, связанных с охраной труда и окружающей среды с учетом ограничений безопасности и требований эффективности, отличающийся наглядностью, эффективностью, комплексностью и универсальностью.

Ключевые слова: охрана труда, охрана окружающей среды, технические решения.

Введение. Организация производства требует разработки специалистами и принятия руководителями системы технических решений по достижению целей производства с реализацией этих решений в составе планирования и управления предприятием. Эта система решений обеспечивает ритмичный выпуск продукции или оказание услуг нормативного качества с необходимой производительностью при полном использовании производственной мощности предприятия, надлежащими условиями безопасного труда без загрязнения окружающей среды и с минимальным расходом производственных ресурсов. В системе технических решений различают ограничения и параметры оптимизации. Нормативное качество продукции или услуг с необходимой производительностью, безопасный труд работников (отсутствие случаев травмирования рабочих или ухудшения их здоровья) и работа предприятия без загрязнения окружающей среды являются ограничениями, т.е. показателями, которые должны быть обеспечены неукоснительно. Расход производственных ресурсов (материалов, энергии и труда) при этом служит параметром оптимизации, значение которого стремятся минимизировать.

Необходимость совершенствования выбора лучшего технического решения обусловлена большим объемом работ по подготовке производства и их влиянием на безопасность труда и защиту окружающей среды, требованиями уменьшения сроков и затрат на подготовку этого производства.

Методы исследования. *Техническое решение* – построение оптимальной структуры объекта или процесса. В качестве объектов выступают средства производства (технологическое оборудование и оснастка), а в качестве процессов принимают действия рабочих и работу оборудования. Время предстоящего использования технического решения соответствует амортизационному сроку службы оборудования – 6–10 лет.

Требования к техническому решению:

- содержание принципиально новых элементов;
- пригодность как для разработки средств производства, так и для разработки его процессов;
- возможность применения в смежных устройствах или процессах (модульность);
- обеспечение ограничений по выпуску продукции или оказанию услуг надлежащими условиями безопасного труда без загрязнения окружающей среды;
- экономическая эффективность.

Таким образом, технические решения, касающиеся безопасности труда и экологической безопасности, связаны с выполнением технологическими объектами заданной функции с наименьшими затратами труда, материалов и энергии. Основной показатель назначения средства технологического оснащения – выполняемые ими функции. В то же время этими функциями описываются технологический процесс, операция или ее часть. Это обуславливает общность подходов, с помощью которых описывают варианты их структур и находят лучшую из них. Однако большинство работ или не учитывает новизну и перспективность технических решений, или не рассматривает многоуровневость устройств и многооперационность процессов.

В данной работе использованы основы теории графов, динамического программирования и морфологического анализа.

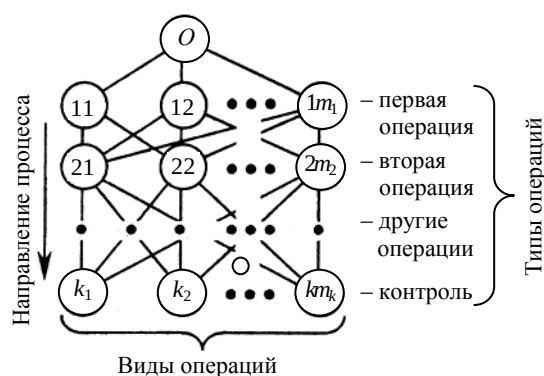
Основная часть. *Постановка задачи выбора технического решения, обеспечивающего безопасный труд и защиту окружающей среды.* Выбор безопасного и эффективного технологического процесса (устройства) основан на представлении различных сочетаний операций (механизмов), составляющих этот процесс (устройство), с поиском оптимального варианта с использованием процедуры математического программирования. Оценочный критерий (параметр оптимизации) технического решения – сумма затрат на подготовку процесса или создание устройства и затрат на их текущее обеспечение, отнесенных к выпуску единицы продукции или оказание одной услуги.

Постановка задачи структурного синтеза технического решения – из числа существенных его признаков образовать структуру, обеспечивающую безопасное выполнение заданной технологической функции с наименьшими приведенными затратами.

Существенными признаками технического решения являются составляющие его технологические переходы или элементарные механизмы, их связи и отношения между собой.

Модель решения. Стремление повысить эффективность решения поставленной задачи обусловило разработку моделей технических решений в виде графов и их оптимизацию. Здесь новизну решений определяет «морфологический анализ» [1; 2], рассматривающий на графах сотни или тысячи сочетаний составляющих операций или механизмов, среди которых обнаруживаются патентоохраняемые решения. Эффективность решений обуславливает применение динамического программирования.

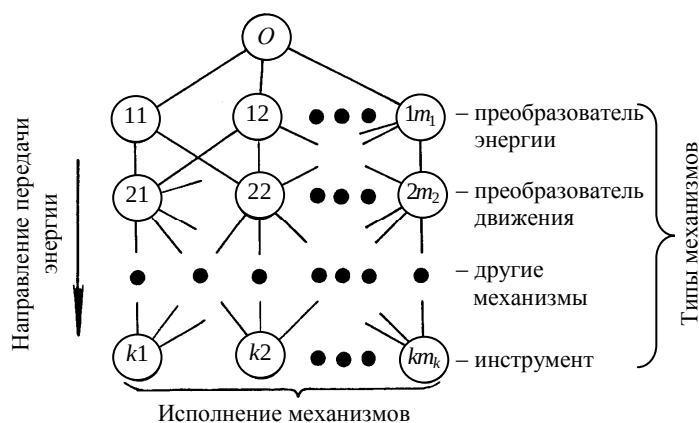
Различные сочетания операций, образующие технологический процесс, выбирают из графа (рис. 1), составленного из вершин и дуг. Каждый горизонтальный ряд вершин графа – это i -тое подмножество однотипных технологических операций ($i = 1 \dots k$). Операция первого типа представлена m_1 ее видами, операция второго типа – m_2 ее видами и т.д., а операция k -того типа (нижняя строка графа) – m_k ее видами. Виды технологических операций выбираются из учебников и справочников, логических и эвристических представлений о различных способах преобразования энергии и вещества, об использовании новых материалов и различных физических эффектов. В граф включают лишь те операции, которые обеспечивают установленные ограничения по безопасности труда, охране окружающей среды и производительности. Модель рассматривает все различные технологические операции как реально существующие, так и потенциально возможные, которые могут быть использованы в процессе. Длину каждой дуги графа определяют как затраты на подготовку и выполнение последующей операции, отнесенные к одному экземпляру (изделию) предмету труда.



1, 2, ..., k – типы операций; $m_1, m_2, \dots, m_k$ – количество видов операций каждого типа

Рисунок 1 – Граф вариантов безопасного технологического процесса

Аналогично, различные структуры технического устройства описываются графом (рис. 2), множество вершин которого соответствует множеству элементарных механизмов, а множество дуг – приведенным затратам на создание и эксплуатацию последующего механизма. В граф включают лишь те механизмы, которые обеспечивают нормативную безопасность, заданные производительность и качество функционирования.



1, 2, ..., k – типы механизмов;
 $m_1, m_2, \dots, m_k$ – количество видов механизмов 1-го, 2-го, k-того типа соответственно

Рисунок 2 – Граф вариантов средства технологического оснащения

Граф, построенный на идеях «морфологического анализа», состоит из k горизонтальных рядов вершин, каждый из которых представляет множество исполнений механизма одного вида. Большое количество вариантов устройства получают за счет различных сочетаний как известных, так и новых его частей.

Каждая составляющая технического решения необходима, а все вместе они достаточны для построения технологического процесса или создания технического объекта. Подмножество вершин, взятых по одной из каждого ряда графа, определяет один вариант решения. Множество таких вариантов W , составленных из конъюнктивно-дизъюнктивных связей «И – ИЛИ», определяется из выражения

$$W \subseteq \{(p_{11} \vee p_{12} \vee \dots \vee p_{1m_1}) \wedge (p_{21} \vee p_{22} \vee p_{2m_2}) \wedge \dots \wedge (p_{k1} \vee p_{k2} \vee p_{km_k})\}, \quad (1)$$

где p_{ij} – признаки.

Возможное количество вариантов решений равно произведению $m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_k$. Несовместимость некоторых частей решения между собой сокращает количество его вариантов и окончательно представляет их реальное количество.

Оптимизация технического решения заключается в следующем: из числа возможных типов и видов, составляющих решения, находят такую их последовательность, которая обеспечивает установленные ограничения по безопасности и производительности труда с наименьшими затратами. На стадии структурного синтеза преимущество отдают новым техническим решениям.

Оптимизация решения выражается в поиске кратчайшего пути из вершины O в одну из вершин нижнего яруса графа, а, соответственно, подмножество вершин на этом пути определяют содержание оптимального технического решения. Поскольку факторы и параметры оптимизации заданы в целочисленном виде, оптимальную структуру решения находят с применением динамического программирования. Процедура оптимизации заключалась в следующем [3]: в каком бы состоянии не находилась производственная система в результате определенного числа шагов, последующее управление на ближайшем шаге выбирают таким образом, чтобы оно в совокупности с оптимальным управлением на всех последующих шагах приводило к минимальному расходу производственных ресурсов PP (в стоимостном выражении) на всех оставшихся шагах, включая данный:

$$PP_{i+1} = \min (\text{по всем вершинам графа}) [PP_i + PP_{(i+1)-1}], \quad (2)$$

где i – операции процесса; PP_{i+1} – расход производственных ресурсов при выполнении $i+1$ операций; PP_i – расход ресурсов при выполнении i операций при условии, что соответствующая часть процесса выбрана оптимальным образом; $PP_{(i+1)-1}$ – расход ресурсов при выполнении $(i+1)$ -той операции процесса.

Аналогично выполняют оптимизацию технического решения по выбору средства технологического оснащения.

Ограничения, касающиеся безопасности труда, исключают контакты движущихся (в том числе вибрирующих) частей устройств, электромагнитных полей, различных излучений, воздействия расплавов, кислот и щелочей, электрического тока с частями тела рабочего, вредных паров и аэрозолей – с его дыхательными путями. Ограничения, касающиеся охраны окружающей среды, требуют, чтобы отходы предприятия были неактивными и безопасными, т.е. переведены в стабильное состояние веществ, которые они имели до использования.

Требования безопасности труда и охраны окружающей среды должны быть учтены и приведены в технологической документации (в том числе в маршрутной и операционной картах, карте эскизов и технологической инструкции). Полноту отражения требований безопасности устанавливают с учетом особенностей технологического процесса и применяемых средств, норм и требований стандартов ССБТ, санитарных норм и правил и других документов, в которых изложены требования безопасности труда, утвержденных в установленном порядке.

Конкретное изложение требований безопасности в документах зависит: от вида опасных и вредных производственных факторов и характера их воздействия на работающих; от возможности пожара и взрыва при выполнении технологического процесса; от применяемых материалов, средств технологического оснащения и действий, выполняемых исполнителями.

Технологические документы подлежат утверждению после проверки наличия отражения в них требований безопасности. В документах указывают: средства индивидуальной защиты (спецодежда, спецобувь, защитные очки и др.) или обозначения (номера) комплектов средств индивидуальной защиты в соответствии с порядком, установленным в отрасли или на предприятии; средства коллективной защиты работающих, используемые непосредственно на рабочих местах (ограждения, защитные экраны, вен-

тиляционные устройства и др.); средства технологического оснащения, обеспечивающие безопасность труда (пинцеты и щипцы для удаления деталей из зоны обработки, крючки для отвода и удаления стружки и др.), которые не являются составной частью используемого оборудования или технологической оснастки, но применяются совместно с этими средствами технологического оснащения.

Расход производственных ресурсов на подготовку и выполнение одной технологической операции или создание технологического объекта включают капиталовложения в здания, оборудование, приспособления и инструмент, текущие затраты на амортизацию основных фондов, затраты на работу и поддержание (техническое обслуживание) и восстановление ресурса (ремонт) оборудования и приспособлений, стоимость материалов и энергии в объеме их норм расхода, заработную плату с начислениями и утилизацию отходов:

$$PP = \sum_1^k M_k C_k + \sum_1^n \mathcal{E}_n C_n + \sum_1^m \frac{t_{ш-к}}{60} \left(C_{ч,р} + C_{м-ч,о} + \frac{K_o k_o}{\Phi_{о,о}} \right), \text{ руб.}, \quad (3)$$

где M_k и C_k – норма расхода (кг, м³ и др.) и цена материала (руб./кг, руб./м³, др.) k -того вида соответственно; $\mathcal{E}_n$ и C_n – норма расхода (Дж) и стоимость (руб./Дж) энергии n -го вида, соответственно; $t_{ш-к}$ – трудовой норматив времени (норма штучно-калькуляционного времени), мин; $C_{ч,р}$ – часовая ставка рабочего, руб./ч; $C_{м-ч,о}$ – стоимость машино-часа работы оборудования, руб./м-ч; K_o – капиталовложения в оборудование, руб.; k_o – доля капиталовложений, приходящихся на год эксплуатации оборудования, год⁻¹; $\Phi_{о,о}$ – годовой действительный фонд времени работы оборудования, ч/год.

Выбранные на графе направления движения из его вершин обозначают стрелками. Эти связи обуславливают оптимальные сочетания частей решения на предыдущих шагах с составляющими решения на последующем шаге. Расчеты при этом ведут от вершин нижнего их ряда к вершине O . В вершины графа вписывают значения Z_{i+1} .

Двигаясь в найденных направлениях из вершины O графа через одну из вершин каждого яруса графа, находят сочетание частей устройства или операций, которое при прочих равных условиях обеспечивает наименьшие затраты на реализацию технического решения. Соответствующее значение целевой функции читают в верхней вершине O графа.

Среди технических решений, синтезируемых графами, встречаются новые патентоохранные решения (не обязательно оптимальные).

Таким образом, рассматриваемый метод выбора технического решения (технологического объекта или процесса для его реализации) основан на учете многообразия освоенных и гипотетически возможных составляющих способов обработки изделий, удовлетворяет установленным ограничениям по безопасности, качеству и производительности и обеспечивает наименьшие затраты на свою реализацию. Если производственные возможности предприятия не позволяют внедрить предложенное решение, то путем исключения его неосуществимых признаков можно найти другое решение, наиболее близкое к оптимальному.

Результаты работы позволяют создать библиотеку лучших (оптимальных или близких к ним) технических решений для разных объемов выпуска продукции или оказания услуг различных видов.

Модульность технических решений заключается в создании процессов или средств из блоков (модулей), сочетание которых определяется конкретными задачами и условиями производства. Каждая модульная операция обеспечена соответствующим типовым оборудованием, приспособлениями, инструментами и средствами измерений. Модульный процесс объединяет в себе преимущества единичного процесса (учитывает особенности конкретной детали), типового процесса (сохраняет идею типизации на уровне обработки модуля поверхностей), группового процесса (объединяет разные детали в группы даже в единичном производстве) и придает процессу гибкость [4]. Основная особенность модульной специализации заключается в применении ограниченного количества модульных технологических операций к обработке неограниченного количества деталей. Модульная технология позволяет внедрить поточную организацию работ в мелкосерийном и единичном производствах. Производство, построенное на модульном принципе, становится гибким, способным в кратчайшие сроки с минимальными затратами перейти на производство продукции или оказания услуг новых видов с минимальным объемом технологической подготовки производства. Применение модульных технологий наиболее эффективно при подготовке многономенклатурного производства. Особую актуальность это направление приобретает в настоящих условиях при отсутствии централизованного финансирования и нежелания бизнеса вкладывать средства в долгосрочные проекты. Капитальные затраты на создание модульного комплекса оборудования ниже, чем типового оборудования, реконструкция производства может выполняться поэтапно, средства, полученные от эксплуатации первых модулей, могут быть использованы для изготовления нового

оборудования. Возможно перепрофилирование производства при его расширении, при этом уменьшаются сроки освоения производства [5].

Закключение. Предложенный метод поиска технических решений, связанных с охраной труда и окружающей среды, отличается наглядностью, эффективностью, комплексностью и универсальностью. Изменяющееся соотношение затрат на материалы, энергию и заработную плату и появление новых технических решений требуют периодического пересмотра результатов оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zwicky, F. The Morphological Method of Analysis and Constructions, Courant, Anniversary / F. Zwicky. – Volume, 1948.
2. Zwicky, F. Entdecken, Erfinden, Torschen im morphologischen Wettbild / F. Zwicky. – Munchen–Zurich, Knaur, 1966.
3. Беллман, Р. Динамическое программирование (пер. с англ.) / Р. Беллман. – М.: Иностр. лит., 1960. – 400 с.
4. Базров, Б.М. Модульный принцип построения механосборочного производства / Б.М. Базров // Вестн. машиностроения. – 1993, № 2. – С. 19–23.
5. Васильев, А.Л. Модульный принцип формирования техники / А.Л. Васильев. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 240 с.

Поступила 05.01.2016

JUSTIFICATION OF TECHNICAL SOLUTIONS RELATED TO OCCUPATIONAL SAFETY AND THE ENVIRONMENT

V. IVANOV, V. DRONCHENKO

Examines changing ratios of costs for materials, energy and salaries and the emergence of new technical solutions requiring periodic review of the optimization results. The method of selection and justification of technical decisions related to health and the environment given the constraints of safety and efficiency requirements, characterized by clarity, efficiency, comprehensiveness and universality.

Keywords: labor protection, environmental protection, technical solutions.

УДК 658.345.3:665.63

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА $TOXI^{+Risk}$

*канд. хим. наук, доц. С.В. ПОКРОВСКАЯ; канд. техн. наук Ю.А. БУЛАВКА; Д.В. ГАЛКИНА
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены результаты сравнительного анализа данных, полученных в ходе моделирования последствий аварий на объектах нефтеперерабатывающей промышленности с использованием программного комплекса $TOXI^{+Risk}$. Показаны возможности программного комплекса решать задачи оценки последствий аварий на опасных производственных объектах на основе построения дерева событий развития сценариев аварий при разрушении аппарата и расчета коллективного и индивидуального рисков смертельного поражения людей в результате крупных аварий. Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при разработке деклараций промышленной безопасности, планов по предупреждению и ликвидации аварий, выполнении обязательств по страхованию гражданской ответственности за причинение вреда в результате аварии, обосновании взрывобезопасных расстояний и безопасности опасных производственных объектов.

Ключевые слова: опасные производственные объекты нефтеперерабатывающей промышленности, моделирование аварий, статистический анализ, программный комплекс $TOXI^{+Risk}$.

Введение. Риск возникновения аварийных ситуаций необходимо оценивать: при разработке деклараций промышленной безопасности для опасных производственных объектов (ОПО); проектировании производственных объектов, на которых получают, используют, перерабатывают опасные вещества, а также объектов, на которых такие вещества образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются; составлении планов по предупреждению и ликвидации аварий; выполнении обязательств по страхованию гражданской ответственности владельца ОПО за причинение вреда в результате аварии на ОПО.

От величины риска зависят эффективность превентивных мероприятий, размер и оптимальность распределения денежных средств, направляемых на уменьшение и предупреждение возможных аварий [1]. Современным инструментальным средством поддержки проведения исследовательских работ в области оценивания техногенного риска и безопасности ОПО является программный комплекс автоматизированного моделирования и расчета $TOXI^{+Risk}$, способный решать задачи оценки последствий аварий на основе построения дерева событий [2].

Обеспечение безопасности функционирования нефтеперерабатывающих предприятий, эксплуатация которых осуществляется с повышенным риском аварий, связанных с процессами транспортировки, хранения, переработки углеводородного сырья, нефти и нефтепродуктов, и которые, как правило, сопровождаются разрушением аппаратов и целых установок вследствие пожаров, взрывов, – фундаментальная проблема современности [3].

Выбор в качестве объекта исследования ОАО «Нафтан» открывает широкие возможности для моделирования последствий гипотетических аварий, что обусловлено одновременным присутствием различных видов опасности: большим количеством нефтепродуктов в системе, обладающих взрыво- и пожароопасностью; использованием высокого давления и высокой температуры в аппаратах; токсическими свойствами газов и паров продуктов переработки.

Целью данного исследования является анализ результатов моделирования последствий аварий (величин коллективного и индивидуального риска, зон действия основных поражающих факторов), возникающих в результате разгерметизации оборудования на основных установках ОАО «Нафтан» с использованием программного комплекса $TOXI^{+Risk}$.

Методы исследований. Величину риска аварий для людей, обслуживающих ОПО, рассчитывали с использованием программного комплекса $TOXI^{+Risk}$, разработанного российской организацией ЗАО «НТЦ “Промышленная безопасность”», на основании построения деревьев отказа и деревьев событий, характеризующих зарождение и развитие аварийной ситуации, а также вероятность их реализации. При помощи ряда программных модулей, включенных в состав программного комплекса $TOXI^{+Risk}$, выполнялся расчет показателей коллективного и индивидуального риска на территории ОПО в соответствии с [4–6]; моделирование взрывов облаков топливно-воздушной смеси (ТВС) и определение зон поражения людей и повреждения зданий в результате взрывов облаков ТВС осуществлялось в соответствии с [7]; расчет последствий теплового воздействия от огненного шара выполнялся в соответствии с [8]; расчет зон возможного поражения осколками при аварийном разрушении емкостного оборудования – в соответствии с [9].

Результаты и их обсуждение. Ряд технологических установок нефтеперерабатывающего предприятия ОАО «Нафтан» согласно Закону Республики Беларусь от 10 января 2000 года № 363-З «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» относятся к *опасным производственным объектам* вследствие использования оборудования, работающего под давлением более 0,07 МПа, а также применения воспламеняющихся, горючих и высокотоксичных веществ.

С целью оценки апостериорного риска развития аварийной ситуации выполнен анализ состояния промышленной безопасности на ОАО «Нафтан». Изучены архивные материалы и статистическая отчетность за период с 1967 по 2015 год. На рисунке 1 представлена динамика объема первичной переработки нефти и числа аварий и инцидентов на ОАО «Нафтан». За указанный период на заводе произошло 5 аварий и 614 инцидентов (к инцидентам относятся отказы, повреждения и нарушения) [10; 11].

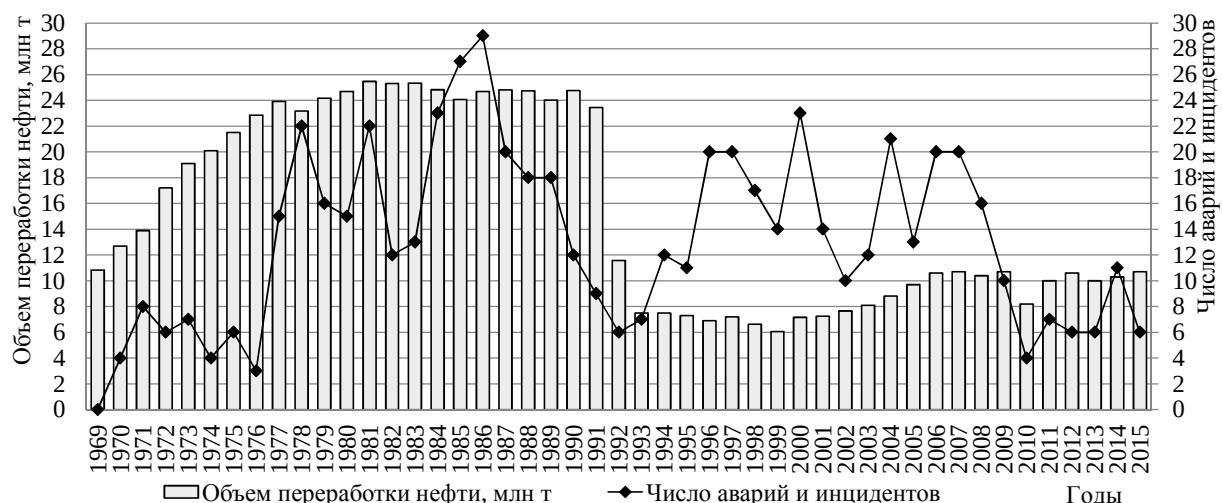


Рисунок 1 – Динамика объема первичной переработки нефти и числа аварий и инцидентов

Результаты выполненного ретроспективного анализа причин аварий и инцидентов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамика причин аварий и инцидентов на ОАО «Нафтан»

Причины аварий и инцидентов	% от числа аварий и инцидентов за период (гг.)					
	1970–1979	1980–1989	1990–1999	2000–2009	2010–2015	1967–2015
Нарушение правил технологического регламента, требований инструкций, ошибочные действия	46,15	27,92	24,22	17,61	4,55	24,51
Выход из строя и износ оборудования	4,40	24,87	18,75	13,21	11,36	15,68
Неудовлетворительное техническое состояние электрооборудования	4,40	15,74	10,16	25,16	4,55	13,70
Коррозии и эрозия оборудования	2,20	4,57	7,03	6,29	15,91	5,63
Неисправность приборов КИП и А	6,59	2,03	7,81	6,92	6,82	5,18
Некачественный монтаж и ремонт оборудования	8,79	8,12	3,13	1,89	2,27	4,87
Природные явления	3,30	4,57	3,91	6,92	2,27	4,41
Повреждение уплотнений	6,59	4,06	3,91	5,03	4,55	4,41
Прогар труб в печах из-за местного перегрева и отложений кокса	4,40	3,05	3,13	2,52	13,64	3,65
Конструктивные недостатки	6,59	3,05	1,56	2,52	6,82	3,20
Низкое качество сварных швов	–	4,06	2,34	1,26	9,09	2,59
Подрыв пружинного предохранительного клапана	2,20	2,03	2,34	1,26	6,82	2,13
Переполнение емкостей, резервуаров и промканализации	4,40	3,05	0,78	1,26	–	2,13
Пробки, попадание твердых частиц, накопление смолистых соединений	3,30	1,02	2,34	3,14	–	1,98
Гидроудар, попадание жидкости в цилиндр компрессора	–	0,51	2,34	2,52	2,27	1,37
Проектные недоработки процесса	1,10	1,02	2,34	0,63	–	1,07
Самовоспламенение веществ	1,10	–	4,69	–	–	1,07
Прочие	2,20	1,02	2,34	3,14	9,09	2,44

Из таблицы 1 видно, что наиболее частыми причинами аварий и инцидентов (около 30% от общего числа) являются причины, связанные с «человеческим фактором», а именно: неквалифицированные и ошибочные и несогласованные действия персонала; ошибочная передача команды; некачественные монтаж и проведение ремонтных работ; нарушение инструкции или проекта; проведение огневых работ на неподготовленном месте. Однако отмечается тенденция к снижению аварий и инцидентов, обусловленных данными причинами, за десятилетние периоды наблюдения. На втором и третьем ранговых местах находятся причины, связанные с выходом из строя оборудования вследствие его физического износа и обусловленные сбоями электроснабжения вследствие короткого замыкания и повреждения изоляции питающих кабелей. Кроме того, замечена динамика роста числа аварий и инцидентов в связи с неудовлетворительным техническим состоянием электрооборудования, а также с коррозией оборудования.

В ходе топографического анализа определены технологические установки с наиболее высокой частотой возникновения аварий и инцидентов. Так, 17,61% аварийных ситуаций произошли на комплексе установок первичной переработки нефти (ЭЛОУ АВТ-6, ЭЛОУ АВТ-2, АТ-3, АТ-8, ВТ-1, «Ректификация» и др.); 13,57% – на установках каталитического риформинга; 12,92% – на установках гидроочистки топлив; 7,43 % – на комплексе «Гидрокрекинг» и установке мягкого гидрокрекинга; 6,46% – на комплексе установок по получению индивидуальных ароматических углеводородов (выделение суммарных ксилолов, «Таторей», «Детол»; изомеризация ксилолов; получение параксилола, ортоксилола, псевдокумола, этилбензол и др.); 5,82% – в цеху электроснабжения; 5,49% – в товарно-сырьевом цеху; по 2,75% на установках получения присадок, серной кислоты и в блоке оборотной воды; 2,42% – на установке Висбрекинг-Термокрекинг. Среди отдельных установок производств смазочных масел и битумов по частоте возникновения аварий и инцидентов выделяются: установка деасфальтизации (3,23%), установка депарафинизации масел (2,42%), установки селективной очистки масел (1,94%) и производства битумов (1,62%).

С целью оценки априорного риска проанализировали вероятности развития нежелательных сценариев, приводящих к негативным последствиям. В качестве исходного события принимали разгерметизацию технического устройства (аппарата). Вероятность развития каждого сценария рассчитана на основании построенных деревьев событий, представленных на рисунке 2.

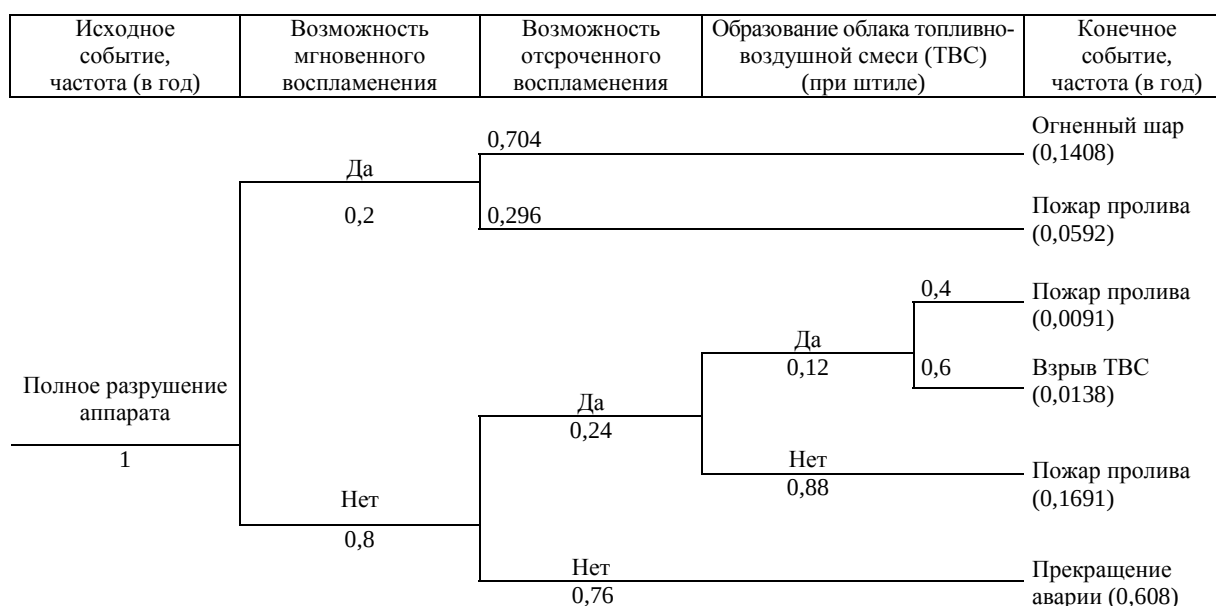


Рисунок 2 – Дерево событий развития сценариев аварии при разрушении аппарата

Технологические процессы ведутся в закрытых герметичных аппаратах, что исключает выделение опасных веществ в атмосферу при нормальной работе установки (цеха). Любые нарушения технологического режима при обслуживании технологического оборудования могут привести к разгерметизации оборудования с последующим выбросом нефтепродуктов, растворителей и других вредных веществ. Последствиями разгерметизации могут быть: пожар пролива, факельное горение, «огненный шар», дефляция, детонационный взрыв, токсическая волна, формирование возможной взрывоопасной зоны.

Взрывы топливно-воздушной смеси представляют значительную опасность. Воздействие ударной волны может привести к сильным разрушениям оборудования, трубопроводов и травмированию людей. *Огненный шар* представляет опасность смертельных ожогов. *Пожары проливов* в силу больших площадей пролива – опасность в основном как очаги возникновения крупных аварий. *Токсическая волна* – опасность острого отравления персонала. *Возможная взрывоопасная зона*, образующаяся при разрушении оборудо-

вания и дрейфе облака углеводородных газов и паров, может выходить за пределы установок и при наличии источника воспламенения приводить к взрыву. Подобные аварийные ситуации могут привести к огромным разрушениям и многочисленным человеческим жертвам, а также способствовать загрязнению значительных территорий предприятия и выйти за его границы.

Выполнено моделирование аварийных ситуаций, возникающих в результате разгерметизации оборудования на основных установках ОАО «Нафтан» с последующей оценкой индивидуального и коллективного риска с использованием программного комплекса $TOXI^{+Riks}$, результаты расчетов представлены в таблице 2. Для каждой установки рассмотрены несколько единиц оборудования, выбор которого основан на количестве опасных веществ, их физико-химических свойствах, технологических параметрах. Для каждой единицы оборудования рассчитана вероятность разгерметизации с полным его разрушением на основании построенных деревьев отказа. При оценке возможных последствий аварий определены вероятные зоны действия поражающих факторов: возможная взрывоопасная зона ($R_{\text{взрывоопас. зона}}$, м), радиус поражения человека ожогами от воздействия огненного шара ($R_{\text{огн.шар}}$, м) и радиус травмирования людей и повреждения остекления от взрывов газовоздушных смесей ($R_{\text{взрыв ГВС}}$, м).

Под коллективным риском ($R_{\text{кол}}$, чел./год) понимают ожидаемое количество пораженных (смертельно) в результате возможных аварий за определенный период времени, а индивидуальным риском ($R_{\text{инд}}$, год⁻¹) – частоту поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий. В общем случае количественно индивидуальный риск выражается отношением числа пострадавших людей к общему числу рискующих в течение 1 года.

Таблица 2 – Результаты моделирования последствий аварий на основных установках ОАО «Нафтан»

Наименование установки	$\frac{R_{\text{инд}}, \text{год}^{-1}}{R_{\text{кол}}, \text{чел./год}}$	Последствия разгерметизации, м	Вероятность возникновения аварий (максимальная вероятность разгерметизации единицы оборудования), 1/год
1	2	3	4
1. Установка ЭЛОУ АВТ-2	$\frac{6,40 \cdot 10^{-5}}{1,20 \cdot 10^{-8}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1301$ $R_{\text{огн.шар}} - 288,9$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 216$	Электродегидратор ($6,0 \cdot 10^{-6}$), отбензинивающая колонна ($3,4 \cdot 10^{-6}$), вакуумная колонна ($2,6 \cdot 10^{-6}$)
2. Установка ЭЛОУ АВТ-6	$\frac{7,44 \cdot 10^{-5}}{9,48 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1980,5$ $R_{\text{огн.шар}} - 423,9$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 423$	Электродегидратор ($4,1 \cdot 10^{-6}$), резервуар ($8,8 \cdot 10^{-5}$)
3. Установка каталитического риформинга ЛЧ-35-11/600	$\frac{1,10 \cdot 10^{-7}}{3,88 \cdot 10^{-10}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1290,3$ $R_{\text{огн.шар}} - 284,5$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 276$	Реактор гидроочистки ($4,2 \cdot 10^{-5}$), реактор риформинга ($4,3 \cdot 10^{-5}$), резервуар ($2,4 \cdot 10^{-5}$)
4. Установка гидроочистки топлив № 4	$\frac{1,91 \cdot 10^{-6}}{6,69 \cdot 10^{-8}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1388,9$ $R_{\text{огн.шар}} - 593,3$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 275$	Реактор ($6,2 \cdot 10^{-5}$), резервуар ($7,7 \cdot 10^{-6}$)
5. Установка выделения суммарных ксилолов	$\frac{1,84 \cdot 10^{-7}}{6,44 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1519,2$ $R_{\text{огн.шар}} - 330,9$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 515$	Колонны К-101, К-4, К-7 ($6,9 \cdot 10^{-6}$), резервуар ($2,0 \cdot 10^{-6}$)
6. Установка производства бензола и ксилолов «Детол»	$\frac{5,90 \cdot 10^{-6}}{2,06 \cdot 10^{-8}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1425,5$ $R_{\text{огн.шар}} - 260,6$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 255$	Сепаратор высокого давления ($3,2 \cdot 10^{-6}$), реактор очистки отбеливающими глинами ($1,9 \cdot 10^{-6}$), резервуар ($2,1 \cdot 10^{-6}$)
7. Установка изомеризации ксилолов	$\frac{3,52 \cdot 10^{-7}}{1,23 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 366,7$ $R_{\text{огн.шар}} - 138$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 127$	Реактор ($1,8 \cdot 10^{-6}$), колонны 407/101 ($4,5 \cdot 10^{-6}$)
8. Установка получения параксилола методом «PAREX-UOP»	$\frac{3,48 \cdot 10^{-6}}{4,22 \cdot 10^{-8}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1212,5$ $R_{\text{огн.шар}} - 241,4$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 223$	Емкость сырья ($7,4 \cdot 10^{-5}$), адсорбер ($8,3 \cdot 10^{-6}$), колонны рафината ($6,2 \cdot 10^{-6}$), резервуар десорбента ($8,2 \cdot 10^{-6}$)
9. Установка производства ортоксилола	$\frac{6,27 \cdot 10^{-8}}{2,20 \cdot 10^{-11}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 5570,9$ $R_{\text{огн.шар}} - 483,1$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 480$	Колонны К-1, К-2, К-3 ($1,8 \cdot 10^{-8}$), резервуар ($1,9 \cdot 10^{-6}$)
10. Установка «Висбрекинг Термокрекинг»	$\frac{5,41 \cdot 10^{-7}}{1,90 \cdot 10^{-10}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 998,6$ $R_{\text{огн.шар}} - 218$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 189$	Гомогенизатор сырья ($3,8 \cdot 10^{-6}$), колонна ректификационная К-4 ($1,0 \cdot 10^{-7}$)
11. Установка изомеризации бензинов «Репех»	$\frac{3,80 \cdot 10^{-7}}{1,33 \cdot 10^{-10}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 526$ $R_{\text{огн.шар}} - 261,6$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 285$	Реактор изомеризации ($1,4 \cdot 10^{-7}$), стабилизатор ($1,3 \cdot 10^{-7}$)
12. Установка «Фракционирование» комплекса «Гидрокрекинг»	$\frac{8,05 \cdot 10^{-7}}{2,82 \cdot 10^{-10}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 2054,2$ $R_{\text{огн.шар}} - 474,8$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 234$	Основная фракционирующая колонна ($3,3 \cdot 10^{-7}$), колонна-дебутанизатор ($7,9 \cdot 10^{-7}$)

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
13. Установка «Юникрекинг» комплекса «Гидрокрекинг»	$\frac{3,71 \cdot 10^{-7}}{1,24 \cdot 10^{-10}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1729,6$ $R_{\text{огн.шар}} - 154,3$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 223$	Реактор ($7,3 \cdot 10^{-7}$), сепаратор ($1,1 \cdot 10^{-7}$)
14. Комплекс установок «Изомеризация бензиновых фракций» и «Таторей»	$\frac{6,09 \cdot 10^{-6}}{4,62 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 1280,7$ $R_{\text{огн.шар}} - 281,6$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 288$	Сепаратор высокого давления ($1,7 \cdot 10^{-6}$), колонна стабилизации изомеризата ($1,4 \cdot 10^{-5}$), реактор блока доочистки ($1,3 \cdot 10^{-5}$)
15. Установка сероочистки сухих газов и рефлюкса	$\frac{5,20 \cdot 10^{-7}}{1,73 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 3458,1$ $R_{\text{огн.шар}} - 633,6$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 268$	Емкость Е-2 ($1,6 \cdot 10^{-7}$), емкость Е-3 ($4,5 \cdot 10^{-7}$)
16. Установка деасфальтизации гудрона пропаном	$\frac{1,40 \cdot 10^{-5}}{4,67 \cdot 10^{-8}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 4065$ $R_{\text{огн.шар}} - 380,4$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 359$	Колонны К-1 и К-2 ($2,5 \cdot 10^{-7}$), испаритель Э-1 ($3,7 \cdot 10^{-7}$), колонна К-9 ($1,0 \cdot 10^{-7}$)
17. Установка селективной очистки масел фенолом	$\frac{4,33 \cdot 10^{-6}}{3,87 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 584$ $R_{\text{огн.шар}} - 178,8$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 50$	Колонна К-2 ($3,4 \cdot 10^{-6}$), резервуары № 132, № 233 и № 138 ($1,0 \cdot 10^{-6}$), колонна К-5 ($2,9 \cdot 10^{-6}$)
18. Установка депарафинизации масел № 2	$\frac{5,96 \cdot 10^{-6}}{1,05 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 615,4$ $R_{\text{огн.шар}} - 154,3$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 104$	Испаритель фильтрата К-2, испаритель гача и петролатума К-6 ($5,5 \cdot 10^{-6}$), резервуар № 146 ($1,0 \cdot 10^{-5}$)
19. Парк № 3 товарно-сырьевого цеха № 8	$\frac{4,41 \cdot 10^{-6}}{1,44 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 952,7$ $R_{\text{огн.шар}} - 215,5$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 360$	Резервуары № 295, 36, 37, 44, 48 ($1,7 \cdot 10^{-5}$)
20. Парк № 5 товарно-сырьевого цеха № 8	$\frac{2,81 \cdot 10^{-6}}{8,67 \cdot 10^{-9}}$	$R_{\text{взрыв ГВС}} - 3592,7$ $R_{\text{огн.шар}} - 342$ $R_{\text{взрывоопас. зона}} - 460$	Резервуары № 253, 46, 52, 608 ($1,7 \cdot 10^{-5}$)

Наиболее высока вероятность разгерметизации следующих единиц оборудования ($1,0 \dots 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$): резервуаров в третьем и пятом парках товарно-сырьевого цеха, установках ЭЛОУ АВТ-6, каталитического риформинга, депарафинизации масел; колонны стабилизации изомеризата и реактора блока доочистки на комплексе установок «Изомеризация бензиновых фракций» и «Таторей», реакторов гидроочистки и риформинга на установке каталитического риформинга; реактора на установке гидроочистки топлив и емкости сырья на установке получения параксилола.

Одним из наиболее важных индикаторов уровня промышленной безопасности является величина индивидуального риска гибели, по которому можно судить о степени безопасности человека на прилегающей к потенциально опасному объекту территории. В ряде стран установлено пороговое значение приемлемого индивидуального риска. Так, в Нидерландах, Франции и Дании эта величина составляет 10^{-6} в год; В. Маршалл предлагает значение индивидуального риска $5 \cdot 10^{-5}$ в год как максимально допустимое для мужчин и женщин любого возраста [12].

Российские специалисты предлагают относить к *недопустимому* риску $R_{\text{инд}} \geq 10^{-4}$ в год; к *условно допустимому* (жестко контролируемому риску) $10^{-4} > R_{\text{инд}} > 10^{-5}$ в год; к *приемлемому* (допустимому) индивидуальному риску $R_{\text{инд}} \leq 10^{-5}$ в год [12]. Исходя из этих соображений величина рассчитанного индивидуального риска гибели в $\text{ТОХИ}^{R_{\text{икс}}}$ для всех рассматриваемых технологических установок ОАО «Нафтан» соответствует приемлемому (допустимому) уровню. Наиболее высокие значения как индивидуального, так и коллективного риска характерны для установок первичной переработки нефти и деасфальтизации гудрона пропаном.

Не менее важными показателями для определения состояния промышленной безопасности являются зоны действия основных поражающих факторов. Как видно из представленных данных в таблице 2, каждый из рассмотренных ОПО обладает рядом своих особенностей:

- наибольшая возможная взрывоопасная зона более 400 м характерна для установок выделения суммарных ксилолов, производства ортоксилола, ЭЛОУ АВТ-6, пятого парка товарно-сырьевого цеха;
- наиболее опасными производственными объектами по поражению человека ожогами от воздействия огненного шара (радиус поражения более 400 м) являются установки сероочистки сухих газов и рефлюкса, гидроочистки топлив, производства ортоксилола, установки «Фракционирование» комплекса «Гидрокрекинг» и ЭЛОУ АВТ-6;
- максимальные радиусы травмирования людей и повреждения остекления от взрывов газовоздушных смесей более 1,5 км характерны для производства ортоксилола, установки деасфальтизации гудрона, пятого парка товарно-сырьевого цеха, установок сероочистки сухих газов и рефлюкса, ЭЛОУ АВТ-6, установок «Юникрекинг» и «Фракционирование» комплекса «Гидрокрекинг», суммарных ксилолов.

Вывод. Результаты априорного и апостериорного анализа техногенных рисков на нефтеперерабатывающем предприятии позволили установить, что наиболее опасными производственными объектами на ОАО «Нафтан» являются установки первичной переработки нефти и деасфальтизации гудрона пропаном.

Использование программного комплекса $TOXI^{+Risk}$ для моделирования последствий аварий на опасных производственных объектах позволяет получить объективную информацию о степени опасности объекта, ранжировать прилегающую территорию по уровню индивидуального и коллективного риска, выявить зоны и территории, где необходимо ужесточение контроля и разработка превентивных мер по снижению риска и обеспечению безопасности производственного персонала и населения.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при разработке деклараций промышленной безопасности, планов по предупреждению и ликвидации аварий, при выполнении обязательств по страхованию гражданской ответственности за причинение вреда в результате аварии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глухов, С.В. Подготовка и обработка метеорологических данных для сценариев расчета по методике «ТОХИ-3» при построении полей рисков летального поражения при авариях на опасных производственных объектах // Нефтепромысловое дело. – 2009. – № 8. – С. 75–78.
2. Егоров, А.Ф. Об опыте использования программного комплекса $TOXI^{+Risk}$ для подготовки специалистов в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева / А.Ф. Егоров, Т.В. Савицкая, А.А. Агапов // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 5. – С. 22–24.
3. Тляшева, Р.Р. Принципы обеспечения безопасной эксплуатации объектов предприятий нефтепереработки / Р.Р. Тляшева, И.Р. Кузеев // Нефтегазовое дело. – Уфа, 2005. – № 3. – С. 29–35.
4. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности: руководство по безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 27.12.2013 № 646.
5. Методические рекомендации по проведению количественного анализа риска аварий на опасных производственных объектах магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов: руководство по безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 07.11.2014 № 500.
6. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: руководство по безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 13.05.2015 № 188.
7. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: руководство по безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 20.04.2015 № 159.
8. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: утв. приказом МЧС от 10.07.2009 № 404 (с изм., утв. приказом МЧС России от 14.12.2010 № 649).
9. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009: утв. распоряжением ОАО «Газпром» от 05.10.09 № 326.
10. Апостериорная оценка состояния аварийности на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю. А. Булавка [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 9. – С. 122–128.
11. Булавка, Ю.А. Анализ инцидентов на нефтеперерабатывающем предприятии / Ю.А. Булавка, О.О. Смиловченко, Е. В. Сташевич // Вестн. Командно-инженерного ин-та МЧС. – 2012. – № 2(16). – С. 69–76.
12. Козлитин, А.М. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2002. – 178 с.

Поступила 02.02.2016

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF MODELING CONSEQUENCES OF ACCIDENTS AT DANGEROUS PRODUCTION FACILITIES REFINING INDUSTRY USING THE SOFTWARE, $TOXI^{+RISK}$

S. POKROVSKAYA, YU. BULAUKA, D. GALKINA

The article presents the results of a comparative analysis of information obtained in the course of modeling the effects of accidents in the refining industry objects using $TOXI^{+Risk}$ software. The possibilities of software package to solve the problem of estimating the consequences of accidents at dangerous production facilities on the basis of constructing a tree developments accident scenarios in the destruction of the apparatus and calculation of collective and individual risk of fatal injury to persons as a result of major accidents. The results can be recommended for use in the development of industrial safety declaration, plans for the prevention and elimination of accidents, the fulfilment of obligations on insurance of civil liability for damage resulting from accident, justification of intrinsically safe distances and safety of hazardous production facilities.

Keywords: refining industry, dangerous production facilities, modeling of accidents, statistical analysis, software $TOXI^{+Risk}$.

УДК 658.35:67

ПРОГНОЗИРУЕМАЯ ТРАВМООПАСНОСТЬ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОРМОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

А.Л. МИСУН

(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

Представлены результаты экспериментальных исследований по установлению параметра приведенной плотности отказов кормоуборочных комбайнов, характеризующего вероятность травмоопасной ситуации при восстановлении их работоспособности. Получено значение параметра приведенной плотности потока отказов кормоуборочных комбайнов, характеризующее как вероятность травмоопасной ситуации при восстановлении работоспособности комбайнов, так и оперативность выполнения ремонтных работ. На основе анализа результатов проведенного исследования для улучшения условий труда, защиты операторов мобильной сельскохозяйственной техники от опасных и вредных факторов производственной среды разработаны инженерно-технические решения.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, кормоуборочный комбайн, безопасность труда, профессиональная подготовка.

Введение. Развитие такой жизненно важной отрасли народного хозяйства страны, как животноводство, невозможно без создания прочной кормовой базы. В общем объеме заготавливаемых кормов подавляющую часть (более 60%) занимают измельченные, их производство осуществляется кормоуборочными комбайнами, парк которых в Республике Беларусь составляет более 4 тысяч единиц (табл. 1). В технологическом процессе кормопроизводства они осуществляют операции кошения, измельчения и погрузки измельченной массы в транспортные средства. Следует, однако, отметить, что на долю комбайнов приходится свыше 30% случаев производственного травматизма, отмеченных при эксплуатации мобильных сельскохозяйственных машин. При этом большая часть травм происходит от вредных и опасных факторов, проявляющихся при устранении отказов и технологических регулировок кормоуборочного комбайна, и усиливается в условиях скоротечности уборочных работ и опасности принятия оператором мобильной сельскохозяйственной техники (МСХТ) ошибочной или запоздалой оценки технического состояния комбайна [1].

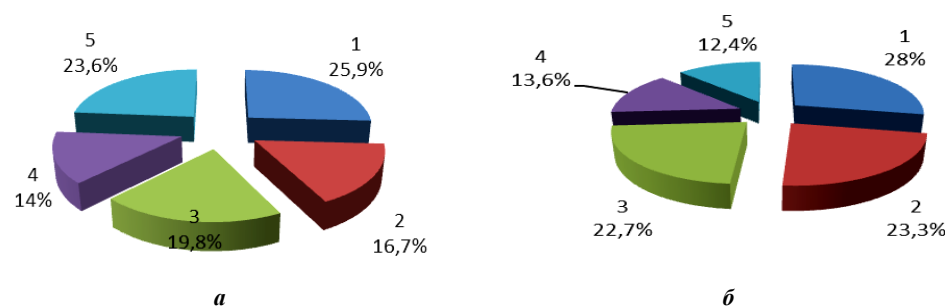
Таблица 1 – Парк кормоуборочных комбайнов и универсальных энергетических средств с кормоуборочными адаптерами в Республике Беларусь

Марка кормоуборочного комбайна (страна-изготовитель)	Всего кормоуборочной техники в республике	В том числе по областям					
		Брестская	Витебская	Гомельская	Гродненская	Минская	Могилевская
КВК-800 «Полесье» (Беларусь)	1077	189	337	236	117	165	33
К-Г-6 «Полесье» (Беларусь)	1237	169	187	223	152	257	249
«Джон-Дир» всех модификаций (Германия)	158	5	3	1	53	68	28
«Нью-Холланд» типа FX всех модификаций (Бельгия)	54	7	2	8	11	26	–
«Клаас Ягуар» всех модификаций (Германия)	506	138	44	62	129	61	72
УЭС-2-250 А с кормоуборочными адаптерами (Беларусь)	1425	261	146	203	164	428	223
Итого:	4457	769	719	733	626	1005	605

Основная часть. Проведенный за двадцатилетний период анализ статистических данных Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Министерства труда и социальной защиты, литературных источников позволил выявить причинно-следственную связь производ-

ственного травматизма в агропромышленном комплексе Республики Беларусь. Установлены следующие закономерности:

- наиболее травмоопасной отраслью сельскохозяйственного производства является растениеводство (плюс переработка сельскохозяйственной продукции) – 28% от всех случаев травматизма в агропромышленном комплексе с тяжелым исходом, около 26% со смертельным (рис. 1);
- наибольшее число пострадавших с тяжелым исходом относится к таким профессиям, как тракторист-машинист, комбайнер, механизатор, о чем свидетельствует рисунок 2;
- к числу наиболее травмоопасных технологических процессов производства продукции растениеводства относится заготовка кормов – травматизм классифицируется как «значительный» в сравнении с другими видами профессиональной деятельности работников АПК и составляет 25%, тогда как при почвообработке – 11,9%, уборке корнеклубнеплодов 8,4% [2];
- уровень опасности профессиональных рисков для операторов МСХТ (тракториста-машиниста, комбайнера, механизатора) классифицируется как «катастрофический» [2].



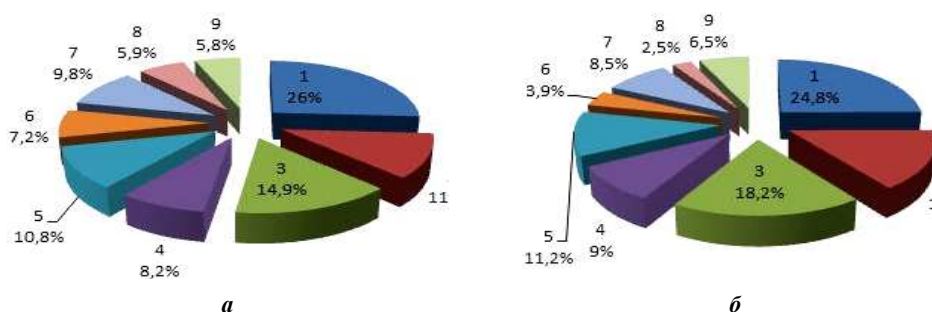
а – со смертельным исходом; б – с тяжелым исходом;

1 – растениеводство и переработка сельскохозяйственной продукции;

2 – ремонтные работы, техническое обслуживание, постановка техники на хранение;

3 – животноводство; 4 – строительство в АПК; 5 – прочие, в том числе дорожно-транспортные происшествия

Рисунок 1 – Распределение несчастных случаев по отраслям сельскохозяйственного производства АПК Республики Беларусь



а – со смертельным исходом; б – с тяжелым исходом;

1 – трактористы-машинисты, механизаторы, комбайнеры;

2 – бригады, рабочие полевые, агрономы, операторы зерносушильных комплексов;

3 – доярки, скотники, пастухи, зоотехники, животноводы; 4 – прорабы, маляры, каменщики, строители;

5 – слесари, газосварщики, станочники, токари, плотники, столяры; 6 – сторожа, грузчики, кочегары;

7 – водители; 8 – инженеры, электрики; 9 – прочие (бухгалтеры, кассиры, кладовщики и др.)

Рисунок 2 – Распределение несчастных случаев «по профессиям» пострадавших в АПК Республики Беларусь (2004–2015 гг.)

В большинстве случаев для анализа безопасности труда операторов МСХТ используется коэффициент частоты травматизма ($K_{\text{ч}}$), рассматриваемый как статистическая оценка вероятности того, что произошло травмирование работника. При этом прогнозирование параметров безопасности труда зачастую не обосновывается количественными их характеристиками, а позволяет установить лишь тенденции изменения состояния производственного процесса, что является лишь промежуточной задачей оценки безопасности труда. Наиболее приемлемым, на наш взгляд, должно быть определение количества возможных опасных ситуаций по вероятности отказов техники и, как следствие, вероятности нахождения работника в опасной производственной зоне. Положительными моментами такого подхода является чет-

кое отражение состояния производственной безопасности «человеко-машинной» системы, а сбор и обработка необходимого для этого статистического материала не требует больших финансовых затрат.

Для проведения хронометражных наблюдений, сбора статистической информации о безопасности труда оператора кормоуборочных комбайнов были подобраны агропредприятия, которые по своим почвенно-климатическим условиям являются характерными для Республики Беларусь, имеют квалифицированные кадры и достаточную техническую оснащенность. Установлены методом экспертных оценок наиболее значимые факторы, влияющие на безопасность труда оператора МСХТ, – это профессиональная его подготовка, травмоопасность используемого технического средства и уровень условий труда на рабочем месте.

Для изучения влияния профессиональной подготовки на безопасность труда учитывалось наличие у операторов специального образования, стаж практической работы, возраст. Корректировался этот показатель с учетом результатов тестирования работников (тест «механической понятливости “Беннета”»). Обработка полученных статистических данных показала, что математическое ожидание случайной величины (в нашем случае показателя профессиональной подготовки оператора МСХТ), равное 0,63, соответствует «среднему» уровню искомого показателя.

Статистическая обработка экспериментальных данных по отказам комбайнов и, как следствие, возможным травмоопасным ситуациям проводилась следующим образом: по опытным данным строилось эмпирическое распределение; вычислялись параметры эмпирического распределения; формировалась гипотеза о виде закона распределения исследуемой случайной величины; по принятому теоретическому закону производилось выравнивание эмпирической кривой; по критериям согласия сравнивалось эмпирическое и теоретическое распределение и на основании этого выносилось решение о принятии или исключении выдвинутой гипотезы. При большом объеме выборки – количестве зарегистрированных отказов ($W > 30$) – сначала строился статистический вариационный ряд, а затем вычислялись оценки числовых характеристик.

Вид потока требований на обслуживание, который поступает от парка кормоуборочных комбайнов, а также количественные его характеристики вместе с распределением времени восстановления работоспособности особенно важны для прогнозирования вероятности травмоопасности при восстановлении работоспособности кормоуборочных комбайнов. О том, что потоки отказов, поступившие от кормоуборочных комбайнов, носят случайный характер, говорит следующее.

Например, в агропредприятиях Пуховичского района Минской области от находившихся под наблюдением в 2015 году шести комбайнов КВК-800 «Полесье» поступало в сутки до 8 отказов всех групп сложности (табл. 2). Случайный характер носили потоки отказов, поступившие за сутки и от других 16 наблюдаемых комбайнов.

Таблица 2 – Потоки требований на обслуживание кормоуборочных комбайнов КВК-800 «Полесье» (хозяйства Пуховичского района; 2015 г.; отказы 1, 2 и 3-й групп)

Количество поступивших требований в сутки k , шт.	Число суток с k требованиями (частота поступления) T_k	Число требований k , поступивших за сезон T_k шт.	Частота поступления требований в сутки, ω_k	Теоретическая вероятность поступления k требований в сутки P_k	Теоретическое число суток с k требованиями TP_k шт.	Теоретическое число требований k , поступивших за сезон kT_k шт.	$ T_k - TP_k $	$(T_k - TP_k)^2$	$\frac{(T_k - TP_k)^2}{TP_k}$
0	0	0	0	0,0202	1,273	0			
1	5 5	5 5	0,079	0,0789	4,971 6,244	4,971 4,971	1,244	1,547	0,248
2	7	14	0,111	0,1539	9,696	19,392	2,696	7,268	0,750
3	10	30	0,159	0,2001	12,606	37,818	2,606	6,791	0,538
4	22	88	0,349	0,1951	17,974	61,896	4,026	16,209	0,902
5	9	45	0,143	0,1522	9,589	47,945	0,589	0,347	0,036
6	7	42	0,111	0,0989	6,231	37,386	0,769	0,591	0,095
7	2	14	0,032	0,0551	3,471	24,297	1,471	2,164	0,623
8	1	8	0,016	0,0269	1,695	13,560			
9	0	0	0	0,0116	0,731	0,658			
10	0	0	0	0,0045	0,283	2,830			
11	0 1	0 8	0	0,0016	0,101 2,854	1,111 18,700	1,854	3,437	1,204
12	0	0	0	0,0005	0,031	0,372			
13	0	0	0	0,0002	0,013	0,169			
$\Lambda = 3,9$ шт.; $P = (P(\chi^2 \geq \chi^2_{\text{выч}}) = 0,60 > 0,05)$ $m = 6$ шт.; не противоречит									

Экспериментальный материал позволил выявить и необходимый для оценки простоев техники характер распределения времени восстановления работоспособности кормоуборочных комбайнов.

Так, среднее время восстановления работоспособности, например, кормоуборочных комбайнов КВК-800 «Полесье» составило 1,53 ч (табл. 3).

Таблица 3 – Статистические вариационные ряды времени восстановления кормоуборочных комбайнов КВК-800 «Полесье» (хозяйства Пуховичского района; 2015 г.; отказы 1, 2 и 3 групп)

№ интервала	Границы интервала	Середина интервала в долях t_{cp}	Середина интервала t_i , ч	Частота интервала W_i	Накопленная частота ΣW_i , ч	$t_i W_i$	$\overline{F}(t)$	$F(t)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0...0,5	0,168	0,25	81	81	20,25	0,329	0,155
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	0,5...1,0	0,503	0,75	44	125	33,00	0,508	0,395
3	1,0...1,5	0,839	1,25	26	151	32,50	0,614	0,568
4	1,5...2,0	1,174	1,75	22	173	38,50	0,703	0,691
5	2,0...2,5	1,510	2,25	17	190	38,25	0,772	0,779
6	2,5...3,0	1,846	2,75	14	204	38,50	0,829	0,342
7	3,0...3,5	2,181	3,25	12	216	39,00	0,878	0,887
8	3,5...4,0	2,517	3,75	10	226	37,50	0,919	0,919
9	4,0...4,5	2,852	4,25	8	234	34,00	0,951	0,942
10	4,5...5,0	3,188	4,75	7	241	33,25	0,980	0,959
11	5,0...6,5	3,859	5,75	$\left. \begin{matrix} 3 \\ 2 \end{matrix} \right\} 5$	244	17,25	0,992	0,979
12	6,5...8,0	4,866	7,25		246	14,50	1,000	0,992
Итого:	–	–	–	$W = 246$	–	376,50	–	–
$t_{cp} = 1,53$ ч								
$F_n(t)$	$F_e(t)$	Теоретическая вероятность i -го интервала P_i	Теоретическая частота i -го интервала WP_i	$ W_i - WP_i $	$(W_i - WP_i)^2$	$\frac{(W_i - WP_i)^2}{WP_i}$		
10	11	12	13	14	15	16		
0,143	0,166	0,284	69,864	11,136	124,010	1,775		
0,371	0,421	0,203	49,938	5,938	35,260	0,706		
0,538	0,598	0,145	35,670	9,670	93,509	2,621		
0,660	0,721	0,104	25,584	3,584	12,845	0,502		
0,751	0,806	0,074	18,204	1,204	1,450	0,0080		
0,817	0,866	0,053	13,038	0,962	0,925	0,071		
0,866	0,907	0,038	9,348	2,652	7,033	0,753		
3,901	0,935	0,027	6,642	3,358	11,276	1,698		
0,927	0,955	0,019	4,674	3,326	11,062	2,367		
0,947	0,969	0,014	3,444	3,556	12,645	3672		
3,971	0,985	0,021	$\left. \begin{matrix} 5,166 \\ 1,968 \end{matrix} \right\} 7,134$	2,134	4,554	0,638		
0,989	0,995	0,008						
Итого:	–	0,990	243,54	–	–	14,883		

$$r_1 = 1,09; \quad t_{cp}^e = 1,67 \text{ ч}; \quad P(\chi^2 \geq \chi_{выч}^2) = 0,15 > 0,05$$

$$r_3 = 0,92; \quad t_{cp}'' = 1,41 \text{ ч}; \quad \text{не противоречит}$$

Проверка по критерию Пирсона (хи-квадрат) согласованности статистических распределений с теоретическим показала, что выдвинутые гипотезы о распределении потока требований на обслуживании и времени восстановления работоспособности кормоуборочных комбайнов соответственно по законам Пуассона (рис. 3) и экспоненциальному (рис. 4).

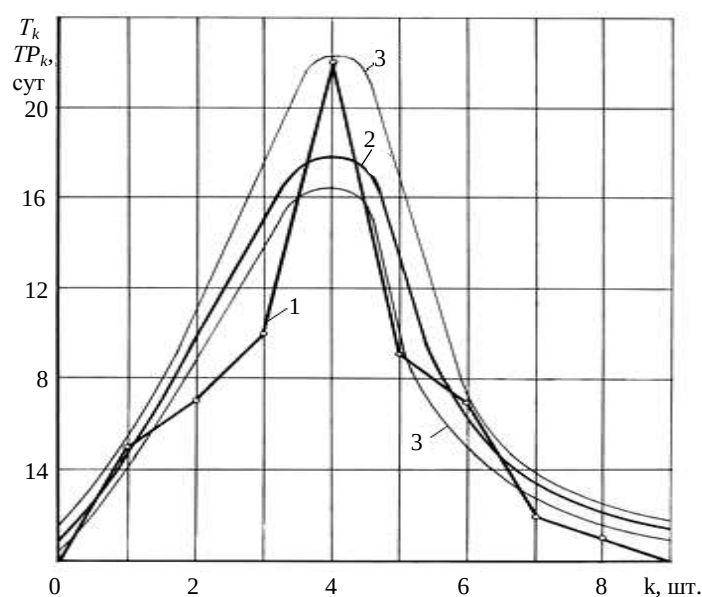


Рисунок 3 – Экспериментальное (1), теоретическое (2) распределения и доверительные границы (3) потока требований на обслуживание кормоуборочных комбайнов агропредприятий Пуховичского района Минской области (2015 г.)

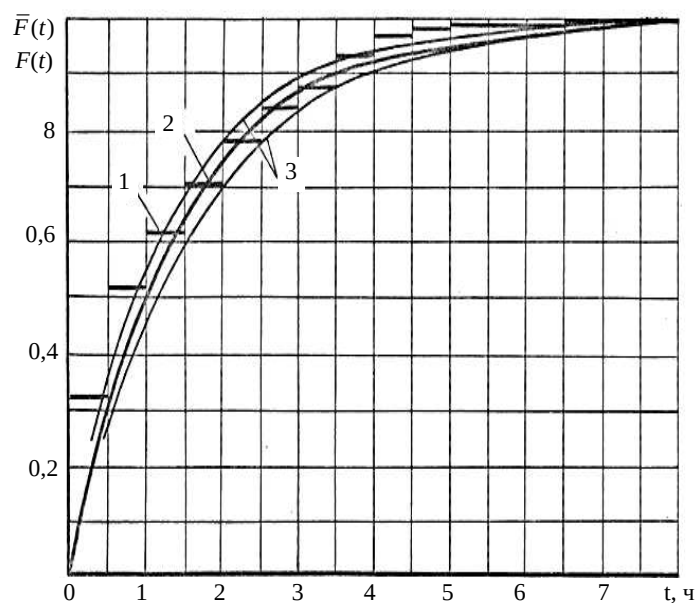


Рисунок 4 – Гистограмма (1), функция распределения (2) и доверительные границы (3) времени восстановления кормоуборочных комбайнов агропредприятий Пуховичского района Минской области (2015 г.)

Анализ результатов исследований показал, что среднее значение параметра приведенной плотности потока отказов, используемого для оценки вероятности травмоопасности при восстановлении работоспособности кормоуборочных комбайнов, для отечественной техники составляет 0,157, что в 1,3 раза выше, чем, например, для кормоуборочных комбайнов «Клаас Ягуар».

Для улучшения условий труда, защиты операторов МСХТ от опасных и вредных факторов производственной среды разработаны инженерно-технические решения, подтвержденные патентами Республики Беларусь [3–5].

Заключение. В результате проведенных исследований получено значение параметра приведенной плотности потока отказов кормоуборочных комбайнов, характеризующее как вероятность травмо-

опасной ситуации при восстановлении работоспособности комбайнов, так и оперативность выполнения ремонтных работ. На основе полученного экспериментального материала выявлен характер распределения времени восстановления работоспособности кормоуборочных комбайнов, необходимого для оценки простоев техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаренко, В.В. Исследование причин и условий возникновения опасной ситуации в процессе уборки кормовых культур / В.В. Азаренко, А.Л. Мисун // Весці нац. акад. навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2015. – № 4. – С. 105–112.
2. Пиуновский, И.И. Травматизм работников сельхозпредприятий при производстве продукции растениеводства / И.И. Пиуновский, А.В. Молош // Охрана труда. Сельское хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 91–97.
3. Безопасное сидение транспортного средства: пат. 16448 Республики Беларусь на изобретение, МПК (2006.01) В 60N2/06 / Л.В. Мисун, А.Л. Мисун, А.В. Агейчик, В.А. Агейчик; заявитель Белор. гос. аграрн. технич. ун-т. – № а 20100541; заявл. 09.04.2010; опубл. 30.10.2012 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласн. – 2012. – № 5. – С. 69.
4. Кабина транспортного средства: пат. 16676 Республики Беларусь на изобретение, МПК (2006.01) В 62 Д 33/06, В 60 S 1/56 / Л.В. Мисун, А.Л. Мисун, А.В. Агейчик, В.А. Агейчик; заявитель Белор. гос. аграрн. технич. ун-т. – № а 20101173; заявл. 02.08.2010; опубл. 30.12.2012 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 6. – С. 94–95.
5. Подвеска сидения транспортного средства: пат. 17141 Республики Беларусь на изобретение, МПК (2006.01) В 60 N 2/50 / Л.В. Мисун, А.Л. Мисун, А.В. Агейчик, В.А. Агейчик; заявитель Белор. гос. аграрн. технич. ун-т. – № а 20101444; заявл. 07.10.2010; опубл. 30.06.2013 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 3. – С. 68.

Поступила 05.02.2016

THE PREDICTED INJURY RISK AT MAINTENANCE OF FORAGE HARVESTERS

A. MISUN

Results of pilot studies on establishment of the parameter of the specified density of failures of forage harvesters characterizing probability of an injury-causing situation at restoration of their working capacity are presented. The value of parameter of the specified density of a stream of failures of forage harvesters characterizing as probability of an injury-causing situation at maintenance of combines, and efficiency of performance of repair work is received. On the basis of the analysis of results of the conducted research for improvement of working conditions, protection of operators of mobile agricultural machinery against dangerous and harmful factors of the production environment are developed technical decisions.

Keywords: pilot studies, forage harvester, safety of work, vocational training.

УДК 66.013.8

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ РАБОТЕ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

канд. техн. наук В.И. СЕМЕНОВ; В.А. ДРОНЧЕНКО
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается остро стоящая проблема загрязнения атмосферы при работе котельных установок – снижение выбросов оксидов азота. Проведенные исследования позволили получить зависимости изменения относительной длины и температуры факела от влагосодержания топлива. Разработаны рекомендации по уменьшению образования оксидов азота при сжигании топлива с добавлением эмульсии, полученной на основе отработавших нефтесодержащих продуктов с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя.

Ключевые слова: котельные установки, выбросы оксидов азота, длина и температура факела, эмульсии, пневматический излучатель.

Введение. Проблема защиты окружающей среды сегодня привлекает внимание не только ученых, но и широкой общественности во всем мире. В атмосферу городов выбрасывается свыше 850 млн тонн оксидов азота NO_x . Не последнюю роль в этом играют выбросы, которые образуются в результате сгорания топлива в котельных установках. На предприятиях также накапливаются значительные объемы отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств. Это объясняется необходимостью привлечения значительных финансовых затрат на приобретение оборудования и внедрение технологий для комплексной переработки и утилизации этих отходов. Для большинства малых и средних предприятий это является сложной и не всегда выполнимой задачей. Часто предприятия с целью утилизации отработавших нефтесодержащих продуктов сжигают их в специальных установках, что требует дополнительного расхода топлива, приводит к загрязнению окружающей среды и нерациональному использованию ресурсов.

В Полоцком государственном университете проводятся исследования с целью разработки технологии приготовления мелкодисперсной эмульсии с высокой стабильностью из отработавших нефтесодержащих веществ и растворов технических моющих средств. Полученная эмульсия может использоваться в качестве добавки к топливу для котельных установок [1; 2]. При приготовлении эмульсии поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей разрушаются ударными волнами, возникающими во время работы пневматического излучателя. Использование этой технологии позволяет решить проблему охраны труда и здоровья работников предприятий от вредного воздействия токсичных и пожароопасных материалов, что делает проводимую работу актуальной и является ее целью – снижение выбросов в атмосферу оксидов азота за счет добавления к топливу эмульсии из отработавших нефтесодержащих продуктов.

Методы исследования и приборы для экспериментальных исследований. Концентрация NO и NO_2 в дымовых газах измерялась при помощи анализатора «Testo-350» (рис. 1). Характеристики анализатора дымовых газов представлены в таблице.

Температура факела измерялась при помощи платинородиевой термопары ТПР, имеющей диапазон измерения температуры от 1000 до 1800 °С и пределы допускаемых отклонений измеряемой температуры Δt , равные $\pm 0,005 \cdot t$. По совокупности свойств платинородиевые сплавы являются уникальными материалами для термопар. Их основное свойство – хорошее сопротивление газовой коррозии, особенно на воздухе при высоких температурах. Размеры факела пламени измеряли с помощью модели стальной линейки, помещенной в топку котла.



Рисунок 1 – Анализатор дымовых газов «Testo-350»

Характеристики анализатора дымовых газов

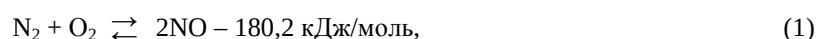
Показатели	Измерение NO	Измерение NO_2
Диапазон измерений	0 ... +4.000 ppm NO	0 ... +500 ppm NO_2
Погрешность	$\pm 5\%$ от изм. знач. (+100 ... +1.999 ppm NO) $\pm 10\%$ от изм. знач. (+2.000 ... +4.000 ppm NO) ± 5 ppm NO (0 ... +99 ppm NO)	$\pm 5\%$ от изм. знач. (+100 ... +500 ppm NO_2) ± 5 ppm NO_2 (0 ... +99 ppm NO_2)
Разрешение	± 1 ppm NO (0 ... +4.000 ppm NO)	± 0.1 ppm NO_2 (0 ... +500 ppm NO_2)

Механизм образования оксидов азота и их влияние на человека. При горении топлива вследствие высокой температуры пламени азот воздуха становится реакционноспособным и, соединяясь с кислородом, образует оксиды типа NO, NO₂ и N₂O. При этом монооксид азота NO составляет 90...95% от суммы всех оксидов азота [3; 4]. На образование диоксида азота NO₂ при коэффициенте избытка воздуха 1,1 и температуре газов 200 °С требуется 35 минут, поэтому он практически не образуется в газовом тракте котла. Геминитрид N₂O термически неустойчив, а доли димера диоксида N₂O₄ и триоксида N₂O₃ очень малы, чтобы их учитывать при исследовании токсичных выбросов котлов.

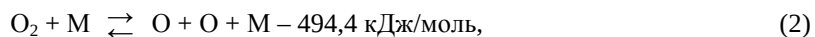
Монооксид азота NO не раздражает дыхательные пути, поэтому человек может его не чувствовать. При вдыхании NO он связывается с гемоглобином, образуя нестойкое нитрозосоединение, быстро переходящее в метгемоглобин, который не может обратимо связывать кислород и, таким образом, выходит из процесса его переноса. Концентрация метгемоглобина в крови 60...70% считается летальной. Но такое предельное значение может возникнуть только в закрытых помещениях. Однако по мере удаления от котельных установок и рассеивания дымового факела происходит доокисление NO до NO₂ свободным кислородом (озоном) атмосферы, поэтому массовый выброс оксидов азота целесообразно рассчитывать по NO₂. В газовых выбросах энергетических котельных установок концентрация NO₂ составляет 0,2...1,2 г/м³ [4]. Диоксид азота сильно раздражает слизистые оболочки дыхательных путей. Вдыхание ядовитых паров диоксида азота может привести к отравлению. Диоксид азота вызывает сенсорные, функциональные и патологические эффекты [5; 6].

К сенсорным эффектам можно отнести обонятельные и зрительные реакции организма на воздействие NO₂. Даже при малых концентрациях, составляющих всего 0,23 мг/м³, человек ощущает присутствие этого газа. Эта концентрация является порогом обнаружения диоксида азота. Однако способность организма обнаруживать NO₂ пропадает после 10 минут вдыхания. Кроме того, NO₂ ослабляет ночное зрение – способность глаза адаптироваться к темноте. Этот эффект уже наблюдается при концентрации 0,14 мг/м³, что ниже порога обнаружения [5; 6]. Функциональным эффектом, вызываемым диоксидом азота, является увеличение усилий, затрачиваемых на дыхание. Эта реакция наблюдалась у здоровых людей при концентрации NO₂ всего 0,056 мг/м³, что в четыре раза ниже порога обнаружения. Люди с хроническими заболеваниями легких испытывают затрудненность дыхания уже при концентрации NO₂, составляющей 0,038 мг/м³ [5; 6]. Патологические эффекты проявляются в том, что NO₂ делает человека более восприимчивым к патогенам, вызывающим болезни дыхательных путей [6]. У людей, подвергшихся воздействию высоких концентраций диоксида азота, чаще наблюдаются такие заболевания, как катар верхних дыхательных путей, бронхиты, круп и воспаление легких. Кроме того, диоксид азота, попадая в организм человека, при контакте с влагой образует азотистую и азотную кислоты, которые разъедают стенки альвеол легких. Некоторые исследователи считают, что в районах с высоким содержанием в атмосфере диоксида азота наблюдается повышенная смертность от сердечных и раковых заболеваний. Диоксид азота представляет собой опасность для здоровья человека, даже если его концентрация в воздухе меньше максимально допустимой эмиссионной концентрации, особенно при длительном действии.

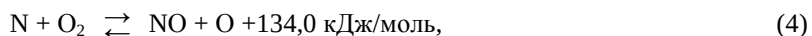
Образование NO при высокотемпературном окислении азота воздуха происходит по радикально-цепному механизму через атомы N и O. Брутто-реакция образования NO [3; 4] может быть выражена как



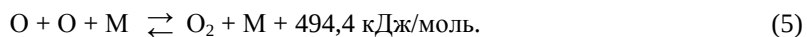
а полная цепная схема этой реакции представляется следующим образом:
иницирование:



образование цепи:



обрыв цепи:



Скорость реакции (1), согласно работам [3; 4], имеет вид

$$\frac{dC_{\text{NO}}}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{C_{\text{O}_2}}} \exp\left[\frac{86000}{RT}\right] \cdot \left\{ C_{\text{O}_2} C_{\text{N}_2} \frac{64}{3} \exp\left[-\frac{43000}{RT}\right] - C_{\text{NO}}^2 \right\}, \quad (6)$$

где O₂, N₂ и NO – мгновенные концентрации компонентов реакции; τ – время протекания реакции, с; T – температура в зоне реакции.

Кроме термической диссоциации паров воды на водород и кислород ($2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + \text{O}_2$), возможна диссоциация воды на водород и гидроксил ($2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + 2\text{OH}$). При горении положительные ионы взаимодействуют с нейтральными молекулами, в результате чего образуются свободные радикалы. Выделяющейся при этом энергии достаточно для расщепления молекулы воды, что во много раз ускоряет реакцию окисления. Ускорение процесса объясняется суммарной реакцией ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$), в результате которой появляется легковоспламеняющийся водород. Атомарный водород – активный восстановитель, способный уменьшить концентрацию NO. Кроме того, взаимодействие водяного пара с углеродом ($2\text{C} + \text{H}_2\text{O} + \text{O} = \text{CO} + 2\text{H}_2 + \text{CO}_2$) снижает концентрацию атомарного кислорода, что также приводит к снижению образования NO_x [4].

Доля оксидов азота в отработавших газах котла растет при коэффициенте избытка воздуха 1,15...1,20, далее падает за счет снижения температуры среды в топке из-за разбавления дымовых газов воздухом [4].

Исследование факторов, влияющих на образование оксидов азота при сжигании углеводородного топлива. Оксиды азота при высокой температуре образуют ряд термодинамической устойчивости: NO, N_2O , NO_2 , N_2O_3 , N_2 . В образовании оксидов участвуют как азот воздуха, так и органические соединения азота с топливом. На образование оксидов азота влияют катализаторы – различные соединения минеральной или минерально-органической составляющей топлива [7]. К увеличению образования NO_x приводит рост мощности горелок и нагрузки котла, а также повышение температуры среды в топке.

Как показали результаты исследований (например, [3; 4; 7]), частичная рециркуляция дымовых газов в топочной камере является одним из эффективных методов подавления выбросов NO_x . В этом случае дымовые газы на выходе из котла забираются и подаются в топку либо через шлицы под горелками, либо через кольцевой канал вокруг горелок, либо путем подмешивания газов в воздух перед газовыми горелками. Последний способ ввода рециркулирующих газов обеспечивает наибольшее снижение температуры в зоне горения. Рециркуляция дымовых газов наряду с уменьшением температуры в топке приводит к снижению концентрации кислорода, т.е. к увеличению зоны горения и более эффективному охлаждению этой зоны топочными экранами. Подмешивая до 20...25 % продуктов сгорания в воздух, удается снизить содержание NO_x на 20...35 %.

В долю вредных выбросов в составе дымовых газов также входят оксиды азота, образующиеся из химически связанного азота топлива (печное топливо, мазут, природный газ). Топливный азот через радикалы частично окисляется до оксидов азота. На отделение атомов азота от элементов топлива затрачивается в 1,5...4,0 раза меньше энергии, чем на диссоциацию молекулы азота из воздуха. Вследствие малой энергии активации образование NO происходит при относительно низкой температуре [4; 8]. Скорость образования NO_x из азота топлива имеет слабую зависимость от температуры среды и обнаруживается уже в начальной части факела при температуре около 1000 К [4; 9]. При этом влияние концентрации кислорода на образование NO_x более существенно – оно проявляется примерно в квадратичной зависимости [4]. Сравнительный анализ зависимостей концентрации оксидов азота в дымовых газах котла типа ДКВр 6,5-13ГМ от влагосодержания эмульсии (рис. 2), приведенный в [2], позволяет качественно оценить влияние времени выгорания капель топлива в факеле котла на уровень образования NO_x .

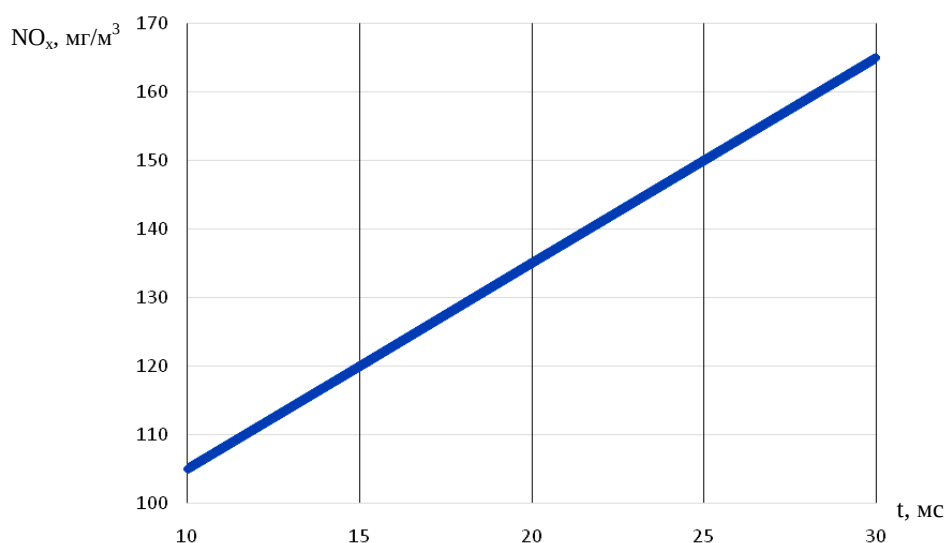


Рисунок 2 – Зависимость содержания оксидов азота NO_x в дымовых газах при сжигании водотопливной эмульсии от времени t выгорания капель в факеле котла [2]

Влага при высокой температуре во время сжигания водотопливной эмульсии вскипает и разрывает капли в факеле котла. При «микровзрывах» диаметр образовавшихся капель достигает 2...5 мм, что увеличивает площадь поверхности испарения, улучшает тепло- и массообмен в факеле пламени и интенсифицирует процесс сжигания топлива. Капля эмульсии диаметром 2 мм и содержанием воды 30% сгорает, например, за 2,8 с, а капля мазута – за 3,7 с, тем самым сокращается время пребывания продуктов горения в высокотемпературной зоне топki котла, что приводит к снижению концентрации NO_x .

При увеличении влагосодержания топливной смеси уменьшается относительная длина факела L_b/L_0 (рис. 3), где L_b – длина факела с использованием водотопливной эмульсии; L_0 – длина факела при сгорании обезвоженного топлива. Дробление капель эмульсии парами воды приводит к тому, что осколки капель разлетаются в разные стороны и поперечные размеры факела увеличиваются при одновременном сокращении относительной длины факела, а объем факела практически не изменяется. Уменьшение длины факела ведет к уменьшению времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературной зоне. В результате образование оксидов азота NO_x в дымовых газах снижается.

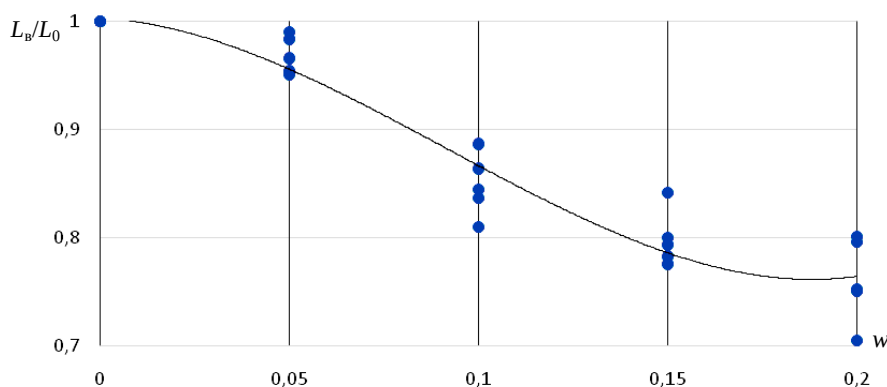


Рисунок 3 – Зависимость относительной длины факела L_b/L_0 от влагосодержания эмульсии w

При выборе вида функциональной зависимости для составления уравнения регрессии использован геометрический метод выбора функциональной зависимости. На координатной плоскости были нанесены точки, соответствующие выборке. В результате, в качестве наиболее подходящего вида параметрической функциональной зависимости выбрана полиномиальная (кубическая). Уравнение регрессии имеет вид:

$$L_b / L_0 = 63,2w^3 - 18,463w^2 - 0,189w + 1,0031,$$

где w – влагосодержание, доля единицы.

Адекватность уравнения регрессии была проверена с помощью критерия Фишера при уровне значимости 5%. Так как расчетное значение получилось больше табличного, уравнение регрессии можно считать пригодным для практического использования.

Добавление к топливу, сжигаемому в котельных установках, мелкодисперсной эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств позволяет не только утилизировать эти вещества, но и, повысив влагосодержание сжигаемого топлива, тем самым уменьшив температуру факела (рис. 4), снизить содержание оксидов азота NO_x в дымовых газах.

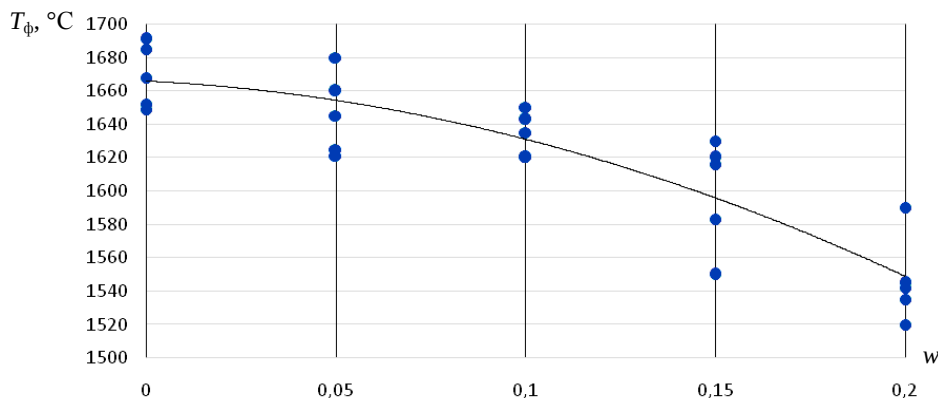


Рисунок 4 – Изменение температуры факела T_f от влагосодержания w

Содержание 10% воды в эмульсии от объема смеси обуславливает снижение температуры факела примерно на 30...50 °С, а при содержании воды 20% – на 100...150 °С.

Получено следующее квадратичное уравнение регрессии:

$$T_{\phi} = -2354,3w^2 - 112,34w + 1665,5,$$

где T_{ϕ} – температура факела, °С.

Таким образом, на основе результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие *выводы*:

- увеличение влагосодержания топлива сжигаемого в котельных установках за счет использования в качестве добавки к топливу мелкодисперсной эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств позволило снизить содержание оксидов азота в дымовых газах котла на 24...45 %;

- снижение концентрации оксидов азота достигнуто за счет сокращения времени горения влагосодержащего топлива, уменьшения длины факела и снижения температуры факела по сравнению со временем горения обезвоженного топлива.

Заключение. Проведенные исследования позволили оптимизировать технологию сжигания топлива в котельных установках с добавлением эмульсии, приготовленной на основе отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств ударными волнами, возникающими при работе пневматического излучателя. Это не только снижает концентрацию оксидов азота в дымовых газах котельных установок, но и решает проблему охраны труда и здоровья работников предприятий от воздействия отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дронченко, В.А. Рециклинг жидких производственных отходов, содержащих нефтепродукты / В.А. Дронченко // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: тр. второй науч.-техн. конф.; под ред. А.И. Свириденка. Ч. II. – Гродно, 1997. – С. 308–311.
2. Иванов, В.П. Утилизация сточных вод с нефтесодержащими отходами эмульгированием и сжиганием / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2015. – № 4. – С.141–146.
3. Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович, П.Я. Солодовников, Д.А. Франк-Камецкий. – М.–Л.: Наука, 1977. – 145 с.
4. Кривоногов, Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды / Б.М. Кривоногов. – Л.: Недра, 1986. – 280 с.
5. Охрана окружающей среды: учеб. для вузов / Я.Д. Вишняков [и др.]; под ред. Я.Д. Вишнякова. – М.: Академия, 2013. – 286 с.
6. Фрумин, Г.Т. Загрязнение атмосферного воздуха в крупных городах России и риск здоровью / Г.Т. Фрумин // Экологическая химия. – 2002. – № 2. – С. 73–77.
7. Скворцов, Л.А. Промышленная теплоэнергетика и экология: учеб. пособие / Л.А. Скворцов, Г.Н. Матвеева, Б.К. Сенечкин. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2002. – 48 с.
8. Flame structure and stabilization mechanisms in a stagnation-point reverse-flow combustor / Mohan K. Bobba [et al.] (Georgia Institute of Technology, Atlanta) // Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power. – 2008. – V. 130, № 3. – P. 031505/1–031505/8.
9. Hernandez, R. Flame imaging as a diagnostic tool for industrial combustion / R. Hernandez, J. Ballester // Combustion and Flame. – 2008. – V. 155, № 3. – P. 509–528.

Поступила 17.12.2015

REDUCTION OF EMISSIONS OF NITROGEN OXIDES WHILE WORKING IN BOILER PLANTS

V. SEMENOV, V. DRONCHENKO

Discusses the acute problem of air pollution while working in boiler plants – reduction of NO_x emissions. The conducted research allowed to obtain the dependences of the relative change of length and temperature of the plume of the moisture content of the fuel. Recommendations for reducing the formation of nitrogen oxides during combustion of the fuel with the addition of the emulsion derived from spent oil-containing products with the help of shock waves arising from the operation of the pneumatic transducer.

Keywords: boiler installations, emissions of nitrogen oxides, length and temperature of the torch, emulsion, pneumatic transducer.

УДК 66-936.42

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ СТРУЙНЫХ АППАРАТОВ СИСТЕМЫ «ЖИДКОСТЬ – ГАЗ»

канд. техн. наук *Е.В. САФРОНОВА*; канд. техн. наук, доц. *А.В. СПИРИДОНОВ*;
канд. техн. наук *А.В. МИТИНОВ*
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются струйные аппараты, принцип работы которых основан на том, что жидкость, движущаяся с большой скоростью, эжектирует газ. Этот способ реализуется при исключительной простоте и надежности конструкции в отсутствие подвижных элементов, требующих дополнительных затрат энергии. Показаны конструктивные особенности сопел круглого и прямоугольного сечений, приведена методика их расчета. Выполнены исследования для сравнения эффективности сопел различной конфигурации.

Ключевые слова: струйные аппараты, сопло, коэффициент эжекции, эффективность массопередачи, методика расчета.

Струйные аппараты получают достаточно широкое применение во многих отраслях промышленности. Принцип их работы основан на том, что одна движущаяся с большой скоростью жидкость эжектирует другую жидкость. Этот способ реализуется при исключительной простоте и надежности конструкции в отсутствие подвижных элементов, требующих дополнительных затрат энергии.

Основной характеристикой эффективности процесса является объемный коэффициент эжекции:

$$K_э = Q_г / Q_ж, \quad (1)$$

где $Q_г$ – расход эжектируемого газа, м/с; $Q_ж$ – расход жидкости, м/с.

Известно, что эффективность процессов аэрации характеризуется высокими значениями коэффициента эжекции ($K_э$). Анализ литературных источников [1] показал, что максимальный $K_э$ равен 3 при работе с соплами круглого сечения.

Экспериментальная часть. Исследовалось влияние конструктивных особенностей сопел и их форм на коэффициент эжекции [2]. Выявлено, что при большом отношении периметра сопла к его площади возможно увеличить значение коэффициента эжекции за счет применения плоскощелевых сопел или цилиндрических сопел малого диаметра.

Для обоснования такого перехода выполним ряд математических преобразований.

Из определения коэффициента эжекции

$$K_э = \frac{Q_г}{Q_ж} = \frac{W_г \cdot F_г}{W_ж \cdot F_с}, \quad (2)$$

где $W_г$ – скорость газа, м/с; $W_ж$ – скорость жидкости, м/с; $F_г$ – площадь сечения кольца вовлекаемого газа, м²; $F_с$ – площадь сечения сопла, м².

Принимая скорость газа равной скорости истечения жидкости из сопла, выражение (2) преобразуется в следующий вид:

$$K_э = F_г / F_с. \quad (3)$$

Для цилиндрического сопла (сечение сопла и сечение захваченного струей газа)

$$F_с = 0,785 \cdot d_с^2, \quad (4)$$

$$F_г = 0,785 \cdot [(d_с + 2\delta)^2 - d_с^2], \quad (5)$$

$$\frac{F_г}{F_с} = \frac{(d_с + 2\delta)^2 - d_с^2}{d_с^2} = \left(\frac{d_с + 2\delta}{d_с} \right)^2 - 1, \quad (6)$$

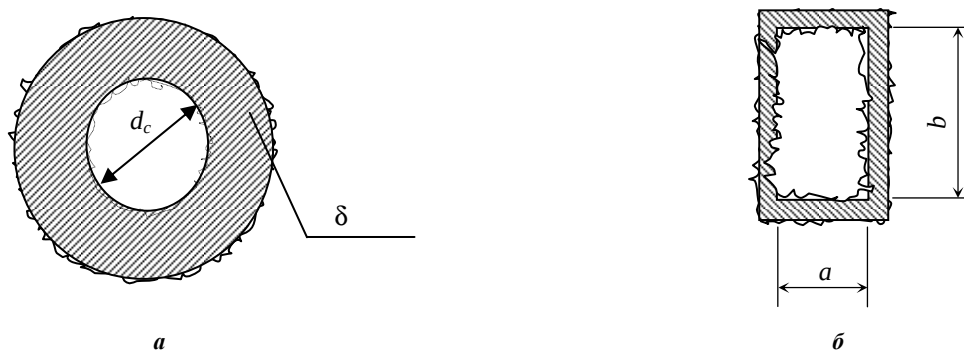
$$K_э = \left(1 + \frac{2\delta}{d_с} \right)^2 - 1. \quad (7)$$

Для плоского сопла

$$K_3 = \frac{(b+2\cdot\delta)\cdot(a+2\cdot\delta)-a\cdot b}{a\cdot b} = \left(\frac{b+2\cdot\delta}{b}\right) \cdot \left(\frac{a+2\cdot\delta}{a}\right) - 1, \quad (8)$$

$$K_3 = \left(1 + \frac{2\cdot\delta}{b}\right) \cdot \left(1 + \frac{2\cdot\delta}{a}\right) - 1. \quad (9)$$

Принцип эжекции струями разного сечения показан на рисунках 1, а, б.



d_c – диаметр сопла; δ – толщина вовлеченного в поток жидкости газа;
 b – длина сопла; a – ширина сопла

Рисунок 1 – Иллюстрация принципа захвата газа струей жидкости из сопла круглого сечения (а), из сопла плоского сечения (б)

Для упрощения процедуры сравнения сопел необходимо сделать некоторые допущения:

- $b/a = 10$ (для эффективной эжекции);
- сечение круглого сопла равно сечению плоского сопла;
- толщина прилипшего слоя газа в обоих случаях составляет: δ_1 – для цилиндрического сопла, δ_2 – для плоского сопла.

Выполняя математические преобразования, получим

$$\frac{K_{э.пл.}}{K_{э.цил.}} = \frac{\left(1 + \frac{2\cdot\delta_2}{b}\right) \cdot \left(1 + \frac{2\cdot\delta_2}{a}\right) - 1}{\left(1 + \frac{2\cdot\delta_1}{d_c}\right)^2 - 1}. \quad (10)$$

В диапазоне изменения d_c от 2 до 20 мм принимаем, что толщина прилипшего слоя газа больше при работе с плоским соплом, что позволило получить коэффициент эжекции для плоского сопла в несколько раз больший, чем для цилиндрического, а это делает его более эффективным по сравнению с цилиндрическим (рис. 2).

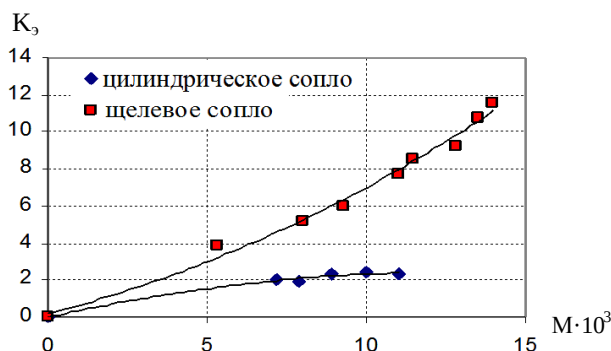


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента эжекции от критерия Маха для цилиндрического сопла диаметром 5 мм и плоскощелевого сопла с шириной щели 5 мм

Как видно из рисунка 2, плоскощелевые сопла действительно имеют большие значения коэффициента эжекции в сравнении с цилиндрическими.

Расчет струйного массообменного аппарата отличается от расчета какого-либо другого массообменного аппарата только закономерностями формирования поверхности контакта взаимодействующих фаз и правильной ее оценкой. То есть для расчета процессов переноса в струйном аппарате необходимо пользоваться основным уравнением массопередачи. Для данного процесса это уравнение имеет вид [2; 3]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta, \quad (11)$$

где Q – количество переданного вещества, $\text{м}^3/\text{с}$; K – коэффициент массопередачи, отнесенный к единице поверхности, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; F – поверхность контакта фаз, м^2 ; Δ – движущая сила процесса массопередачи (может быть выражена в единицах концентрации или в единицах давления).

В каждой конкретной технологической задаче известна величина Q (количество вещества, которое должно быть передано в результате массообмена). Движущая сила процесса определяется конкретными физико-химическими данными по равновесному и рабочему состоянию системы. Причем движущая сила процесса может быть выражена либо как разность равновесной и рабочей концентраций, либо как разность равновесного и рабочего парциальных давлений системы.

Коэффициент массопередачи для газообразной фазы определяется по формуле:

$$1/K = \frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x}. \quad (12)$$

Так, в случае испарения воды с использованием струйных аэракторов основное сопротивление сосредоточено в газовой фазе (что подтверждается и экспериментально), поэтому коэффициент массопередачи принимается равным коэффициенту массоотдачи в газовой фазе (β_y), практически не зависящему от состояния равновесия (величины m) и коэффициента массоотдачи в жидкой фазе (β_x).

Основным и характерным вопросом для струйного аппарата является определение поверхности контакта фаз F , а также её связь с условиями эжектирования и конструкцией эжектора.

Методика выявления подобной зависимости заключается в следующем.

Уравнение для поверхности контакта фаз запишем как [4]:

$$F = \frac{Q_{жс} \cdot f(M)}{W_{пуз}}. \quad (13)$$

Выполняя ряд преобразований, получим выражение для определения поверхности контакта фаз:

$$F = \frac{f(M) \cdot Q_{жс}}{W_{пуз}} = \frac{f(M) \cdot f_c \cdot w_{жс} \cdot W_{зв} / W_{зв}}{W_{пуз}} = \frac{f(M) \cdot f_c \cdot M \cdot W_{зв}}{W_{пуз}} = \frac{Q}{K \cdot \Delta}, \quad (14)$$

где f_c – сечение сопла, м^2 ; M – число Маха; $W_{пуз}$ – скорость подъема газового пузыря, $\text{м}/\text{с}$; $w_{жс}$ – скорость истечения жидкости из сопла, $\text{м}/\text{с}$; $W_{зв}$ – скорость звука в данной среде, $\text{м}/\text{с}$; K – коэффициент массопередачи, $\text{м}/\text{с}$; Δ – движущая сила процесса переноса.

Выражаем из этого уравнения сечение сопла

$$f_c = \frac{W_{пуз} \cdot Q}{f(M) \cdot M \cdot W_{зв} \cdot K \cdot \Delta}. \quad (15)$$

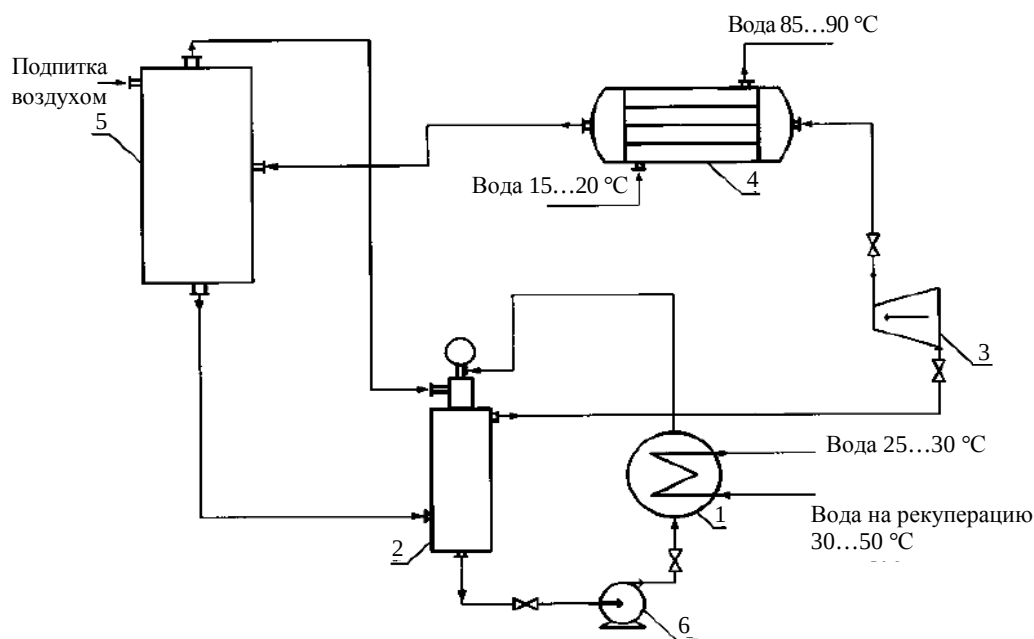
В дальнейшем, задаваясь числом Маха, обеспечивающим режим развитой турбулентности и максимальный коэффициент эжекции, находим следующие параметры технологического процесса: сечение сопла f_c и расход эжектирующей жидкости $Q_{жс}$:

$$M = \frac{w_{жс}}{W_{зв}} = \frac{Q_{жс}}{f_c \cdot W_{зв}}. \quad (16)$$

Расход жидкости, подаваемой на сопло струйного аэратора, находим по формуле:

$$Q_{жс} = \frac{W_{пуз} \cdot Q}{f(M) \cdot K \cdot \Delta}. \quad (17)$$

Зная количество вещества, участвующего в массообменном процессе, коэффициент массопередачи и движущую силу процесса, а также задаваясь значениями числа Маха и K , находим расход циркулирующей через аппарат жидкости, обеспечивающей необходимые значения M и K . Далее определяем сечение сопла f_c . Очевидно, что K , при заданном оптимальном числе Маха будет зависеть от конструкции и размеров сопла. Зная две эти величины, подбирается насос для циркуляции жидкости и конструктивные размеры аэратора. Струйный аппарат в схеме с тепловым насосом [5; 6] показан на рисунке 3.



1 – теплообменник-рекуператор; 2 – струйный аппарат;
3 – ротационно-пластинчатый вакуум-насос; 4 – конденсатор;
5 – сепаратор; 6 – циркуляционный насос

Рисунок 3 – Струйный аппарат в схеме с тепловым насосом

Если при проектировании струйного аппарата необходимо определить только размеры эжекционного сопла, методика расчета заключается в следующем.

При ведении технологического процесса обычно известна допустимая величина перепада давления, создаваемого на сопле. Данной величине перепада давления соответствует определенная скорость истечения жидкости, подаваемой на сопло, которая определяется из выражения

$$w_{жс} = \xi \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot g / \rho_{жс}}, \quad (18)$$

где $w_{жс}$ – скорость истечения жидкости из сопла при определенном перепаде давления, м/с; ξ – коэффициент расхода сопла (берется на основе расчета из опытных данных); ΔP – перепад давления сопла, кгс/см²; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости при рабочих условиях, кг/м³.

Далее становится возможным определить сечение необходимого плоского сопла

$$f_c = \frac{Q_{жс}}{w_{жс}}, \quad (19)$$

где f_c – сечение сопла, м²; $Q_{жс}$ – расход эжектирующей жидкости, м³/с; $w_{жс}$ – скорость истечения жидкости из сопла, м/с.

Закключение. Струйные аппараты используются как нагнетатели, смесители и аэраторы. В качестве последних струйных аппаратов могут эффективно применяться для создания аэрированных систем при инжектировании воздуха или газа в среду, которую необходимо ими насытить (например, для обеспечения протекания биохимических реакций). Этот способ аэрации является весьма привлекательным для использования в таких процессах, как перенос тепла и массы во многих технологиях (в системах с тепловыми насосами). Отсутствие подвижных элементов, контактных устройств, часто забивающихся и увеличивающих гидравлическое сопротивление аппаратов, делает их применение предпочтительным и менее затратным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов, С.Я. Струйные аппараты / С.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
2. Сафронова, Е.В. Моделирование процессов переноса при струйном аэрировании: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Е.В. Сафронова; Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2001. – 110 с.
3. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов: в 2 кн. / Ю.И. Дытнерский. – М.: Химия, 1995. – 400 с.
4. Сафронова, Е.В. Массоперенос при струйном аэрировании / Е.В. Сафронова, Г.Н. Абаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 6. – С. 3–7.
5. Пискун, И.М. Компрессионный тепловой насос с рабочим телом смесь паров воды и воздуха / И.М. Пискун, Г.Н. Абаев // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2007. – № 2. – С. 77–81.
6. Компрессионный тепловой насос с рабочим телом смесь паров воды и воздуха: пат. 16833 Респ. Беларусь, МПК: F25B 30/02, F24D 11/02 / Г.Н. Абаев, И.М. Пискун; заявитель Г.Н. Абаев, И.М. Пискун, ОАО Технолит. – № ф20101400; заявл. 11.12.12; опубл. 28.02.2013 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 2013. – С. 11.

Поступила 14.10.2015

DESIGN AND CALCULATION OF EFFECTIVE JET DEVICES SYSTEM “LIQUID – GAS”

E. SAFRONOVA, A. SPIRIDONOV, A. MITINOV

Jet devices, the principle of which is based on the fact that the fluid moving at high speed, ejects gas are considered. This method is implemented with the extreme simplicity and reliability of design in the absence of moving parts, requiring extra energy. Nozzle constructive design features of round and rectangular sections are shown, the method of their calculation is given. The comparison of the efficiency of nozzles of various configurations is done.

Keywords: jet devices, nozzle constructive design features, ejection coefficient, efficiency of mass transfer, calculation method.

ИНФОРМАЦИЯ

КАК НАПИСАТЬ НАУЧНУЮ СТАТЬЮ (структура материала и организация работы)

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ
(Полоцкий государственный университет)

Если при работе над статьей Вы не сделаете все возможное, чтобы привлечь к ней потенциального читателя, помочь ему понять основной смысл и главные результаты Вашей работы, она может бесследно исчезнуть в океане научной информации...

(В. Будз)

Количество и качество научных публикаций характеризуют научную квалификацию ученого. Магистранты и аспиранты как будущие научные работники должны уметь подготовить материалы и писать научные статьи. Написание научной статьи требует четкого плана и следования рекомендациям, выработанным опытом. Важно знать ряд особенностей, позволяющих написать научную статью, которая будет опубликована, замечена и востребована читателями. Она должна вызвать научный интерес, содержать оригинальные идеи, наблюдения и выводы, быть воспринимаемой за счет четкой структуры и иметь хорошую теоретическую базу. Такая статья обязательно принесёт пользу как читателям, так и самому автору.

Научная статья – логически цельное и законченное литературное произведение, посвященное новому решению научного вопроса.

Выделяют три вида научных статей:

- *обзорные*, посвященные анализу научных достижений в определенной области знаний за последнее время;
- *теоретические*, описывающие результаты исследований на основе теоретического анализа и синтеза;
- *практические*, построенные на основе экспериментов.

Написание обзорной статьи требует больших знаний и опыта. На начальной стадии научной работы оно вряд ли будет по силам начинающему ученому. В технических приложениях в большинстве случаев имеют дело со статьями третьего вида (экспериментальными).

Новизна и научность материала статьи обусловлены тем, что научно обоснованные результаты публикуются впервые. Такая публикация закрепляет за автором кроме научного и юридический приоритет в выбранной области знаний. Польза статьи определяется возможностью применения изложенного материала для удовлетворения запросов производства, обслуживаемого наукой.

Статья – полностью Ваше исследование, в котором Вы только опираетесь на теоретическую базу.

Объем научной статьи должен составлять не менее 0,35 авторского листа (14 тыс. печатных знаков, включая пробелы между словами, знаки препинания, цифры и др.). Площадь и насыщенность рисунков (в том числе графики и фотоснимки) переводится в эквивалентное количество печатных знаков. При работе над диссертацией необходимо учитывать, что научные статьи по теме исследования в установленном количестве и по определенным направлениям должны быть опубликованы в рецензируемых журналах, включенных в перечень научных изданий Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь.

Структура статьи и требования к ее частям

Содержание научной статьи включает не только сам текст с основным содержанием, но и другие обязательные элементы, которые связаны между собой и обуславливают друг друга.

Элементы научной статьи

В белорусских изданиях – название; фамилии авторов и сведения о них; аннотация; ключевые слова; введение; материалы и методы; основная часть; библиографические ссылки; заключение с выводами; библиографический список.

Структура статьи для иностранных журналов несколько отлична.

В российских научных журналах – введение, основная часть и выводы.

В англоязычных изданиях выделяют следующие части: введение (*Introduction*); материалы и методы (*Materials and Methods*); результаты (*Results*); обсуждение и заключения (*Discussion and Conclusions*). Приведенные части в зарубежных изданиях требуется выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию.

Вместе с текстом статьи в редакцию журнала представляют сопроводительное письмо на бланке организации и экспертное заключение о возможности её опубликования.

Цель работы не требуют выделять в качестве обязательной составной части, однако статья должна иметь целевую направленность. Цель дисциплинирует автора, придает статье стройность и упорядоченность.

Статья должна соответствовать поставленной цели. Формулировка цели содержит ответ на вопрос, зачем выполнялась работа.

Цель выражается более высоким результатом в обслуживаемом наукой производстве в виде освоения продукции новых видов, повышения технического уровня и качества продукции или услуг, повышения производительности труда и обеспечения его безопасности, снижения расхода производственных ресурсов и т.д. В соответствии с целью ставят задачи исследования из расчета, чтобы их решение обеспечило достижение поставленной цели. В статье преследуют одну (хотя и комплексную) цель. Если указывают две и более цели, то это предмет написания двух или более статей.

Целью научной работы не может быть исследование, поскольку оно и есть научный процесс достижения поставленной цели.

Цель целесообразно выразить количественным показателем. В заключение работы желательно показать, как он изменился в результате выполнения этой работы.

Название статьи отражает содержание последующего текста, тематику и результаты проведенного исследования. Название статьи кратко и точно суммирует исследование. Ряд авторов считает, что название с использованием ключевых слов включает цель и средства достижения этой цели. В название автор вкладывает информативность, привлекательность и уникальность своего творчества. Однако не следует только названием привлекать внимание, нужно избегать слов, вводящих в заблуждение, не создавать сенсации и иллюзии. В названии не применяют слово «исследование».

Объем понятия, заключенного в название статьи, должен в точности совпадать с объемом понятия последующего статейного материала.

Сведения об авторах статьи содержат их фамилии и инициалы, ученые степени и звания, место работы или учебы, контактные данные. Мы видим одного или нескольких авторов статьи. Естественно, что не все они писали рукопись одновременно. Место в списке отражает распределение участия в написании статьи и объема прав на ее материал. Обычно автор, стоящий в начале списка, выполнил большую часть работы. Автора-руководителя корректно поставить в начало списка. Если ранги авторов равнозначны, а вклад в статью одинаков, то их фамилии следует расположить по алфавиту.

Информацию об авторах и организации, название, аннотацию и ключевые слова обязательно приводят также на другом (обычно английском) языке.

Аннотация – краткая характеристика содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Аннотация отражает основные и ценные, по мнению автора, сведения о работе, в том числе выводы. Аннотация должна быть пригодной для опубликования отдельно от статьи, например в реферативных журналах с целью привлечения внимания широкого круга читателей как внутри страны, так и за рубежом. Средний объем аннотации составляет 5–10 предложений из 300–500 знаков.

Аннотация – это не копия заключения статьи.

Аннотацию пишут в последнюю очередь – когда имеется весь текст статьи.

Ключевые слова – набор слов и фраз, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной области и методов исследования. Рекомендуются количество ключевых слов – 5–7, число слов внутри ключевой фразы – не более трех.

Введение – зачин работы. Во введении автор обосновывает актуальность работы, знакомит читателя с предметом и задачами исследования и стадиями работы. Введение должно содержать:

- анализ проблем производства, обслуживаемого данным научным направлением;
- критическую оценку имеющихся работ по проблеме;
- причины исследования;
- суть научной гипотезы (при необходимости).

Введение служит для того, чтобы ввести читателя в курс дела и обосновать необходимость статьи.

Актуальность работы определяется соотношением состояний дел в производстве и науке. Если в производстве имеется проблема, а в научном направлении нет ее решения, то актуальность статьи налицо.

Любое научное изыскание опирается на предыдущие сведения и источники. Важно в самом начале работы показать, что автор знает о состоянии производства и об исследованиях, которые ранее выполнены отечественными и зарубежными учеными, и о том, как вновь полученные результаты впишутся в имеющиеся знания. Поэтому во введении необходимо отразить результаты предшествующих работ, что удалось сделать ученым, что требует дальнейшего изучения, каковы альтернативы. Автор приводит очерк основных этапов развития научных представлений по рассматриваемой проблеме, включая сопос-

тавательный анализ методологических подходов и уровня развития исследований в соответствующей области знаний в республике и за рубежом. Даже если поставленная Вами проблема абсолютно эксклюзивна, всё равно её можно, так или иначе, связать с близким направлением науки. Не допускается подмена аналитической оценки научных исследований в конкретной области знаний перечислением авторов и выполненных ими исследований. Введение на основе анализа опубликованных работ должно ставить проблему и задавать научные вопросы: каково состояние науки в данной ее области, что требует улучшения и насколько актуально это улучшение.

Наука не сразу приходит к достоверному знанию. Путь к нему лежит в ряде случаев через высказывание интуитивного предположения о связи явлений – *гипотезы*, которая в дальнейшем может быть принята или отвергнута.

Автор статьи, как правило, подвергает критике только то, что будет улучшено его работой. Критика должна быть позитивной, способствующей движению вперед.

Количество работ, рассмотренных в литературном обзоре, должно быть оптимальным: во-первых, эти работы в минимальном количестве без пропусков и повторений должны охватывать суть изучаемой проблемы, во-вторых, каждая из них полезна и, в-третьих, все они вместе достаточны для обоснования необходимости выполнения Вашей работы.

Отсчет начинается с того, что сделано. Ссылки на предшествующие работы в необходимом и достаточном объеме показывают, что проблема существует.

Таким образом, по сути, введение – это постановка научной задачи. Автор выявляет вопросы, которые остались неразрешенными, требующими дальнейшего изучения, и определяет задачи своего исследования в рамках выбранного направления, указав место исследования в данной области знаний. Введение заканчивается обоснованием выбора направления исследований и изложением общей концепции работы.

Материалы и методы – инструмент ученого.

В этой части работы показывают, как и из чего добывалось научное знание.

Экспериментальные материалы (среды) – исходный предмет труда исследователя. В разделе также обосновывают и описывают методики исследования, экспериментальное оборудование, инструменты, приборы, изучаемые физические величины, порядок их измерения, ошибки опытов и т.д. Здесь же автор приводит допущения и расчет погрешностей опытов, а также приемы, используемые для их уменьшения. Описание приводят в том порядке, в каком выполнялся эксперимент. Все вместе это дает возможность другим учеными оценить и (или) воспроизвести исследование. Если исследование на промышленных изделиях или оборудовании невозможно или нецелесообразно, обосновывают использование соответствующих математических или физических моделей этих объектов.

Методов, используемых в работе и приведенных в статье (в том числе, альтернативных), может быть несколько. В разделе явно или неявно присутствует описание объекта и предмета исследования.

Объект исследования – средства производства (оборудование и оснастка); изделия (машины, агрегаты, детали); процессы их изготовления и ремонта; материалы деталей и покрытий; организационные и информационные системы и многое другое, подлежащее изучению и совершенствованию.

Предмет исследования – теории, механизмы превращений, явления, зависимости и другие сведения, содержащие суть нового знания.

Основная часть отражает ход экспериментального исследования и (или) последовательность рассуждений, в результате которых получены теоретические зависимости. В статье описывают стадии экспериментов, промежуточные результаты и обоснование общих выводов в виде физического или статистического объяснения. Доказывают адекватность полученных зависимостей экспериментальным данным с помощью статистических критериев, что дает основание для объективного объяснения этих зависимостей.

В каждой науке ровно столько науки, сколько в ней математики.

(М.В. Ломоносов)

Полученные автором научные результаты должны быть доказаны на основе научной методологии, принятой в данной отрасли науки, и объективно оценены в сопоставлении с известными. Допустимы лишь небольшие спекуляции.

Необходимо также привести сведения об опытах с отрицательным результатом. Здесь, как нигде, уместно отметить, что «отрицательный результат тоже результат». Затраченные усилия исключают проведение аналогичных испытаний в дальнейшем и сокращают путь для идущих следом ученых.

Привлекательность и наглядность как теоретического, так и экспериментального материала зависят от его представления. Эффектное изложение текста сопровождается иллюстративным материалом в виде рисунков, графиков, диаграмм, схем, таблиц, графических моделей и др. Формулы, уравнения, рисунки, фотографии и таблицы должны иметь подписи или заголовки. При их оформлении пользуются ГОСТ 2.105-95 и ГОСТ 7.32-2001. Все приведенные математические и физические величины с указанием размерностей должны быть расшифрованы.

Заключение содержит ёмкое изложение *сущности* результатов работы, обладающих научной новизной, практической и экономической значимостью, а также другие сведения (методики, повышающие достоверность результатов, экспериментальные установки, моделирующие технологические процессы, и др.).

В этой части статьи автор излагает значение работы, прежде всего с субъективной точки зрения. Он представляет полученные результаты на основе своего опыта и знаний. Можно привести несколько возможных объяснений.

Следует обращать внимание на соответствие содержания, объемов понятий материала и заключения. В случае если заключение по объему понятия шире объема материала самой статьи (автор приводит характеристику отсутствующего материала), это можно квалифицировать как научный подлог; если заключение по смыслу уже материала статьи, возможна потеря того, что автор считает важным.

Избегайте простого пересказа положений статьи, в заключении материал должен быть обобщен.

Выводы завершают заключение и содержат тезисы основных достижений проведенного исследования без авторской интерпретации. Это дает возможность другим ученым самим оценить качество выводов.

Обычно первый вывод заключения посвящен ответу на вопрос о том, как и за счет чего достигнута цель работы, а последний – с каким эффектом она достигнута. Во многих статьях в разделе «Выводы» авторы приводят интерпретацию полученных результатов в соответствии с каждой из поставленных задач исследования. В выводах целесообразно показать вопросы, требующие дальнейшего научного разрешения. Если читатель знает, какие фрагменты статьи поддерживают конкретные выводы, он лучше оценит доказательства, приведенные в статье.

Библиографические ссылки позволяют Вам оградиться от усмотрения в статье признаков заимствования и присвоения чужих идей. В статье автор должен давать сведения о цитируемом, рассматриваемом или упоминаемом в тексте статьи материале с указанием его авторов и источников. Ссылки приводятся также на собственные публикации.

Только при наличии таких ссылок статья становится пригодной для погружения в проблематику освещаемого исследования.

Библиографический список имеет самостоятельное значение в качестве библиографического пособия. Опытный читатель обратит внимание на этот список и оценит авторское знание источников по теме исследования. Желательно, чтобы в научной статье присутствовали ссылки на работы, опубликованные в течение последнего года.

Приведенная структура статьи учитывает сложившиеся традиции, но она не исключает новаторство автора в части ее написания.

Организация работы над статьей

Организация работы над статьей должна обеспечить ее установленную структуру при высоком качестве материала.

За написание статьи принимаются тогда, когда пробелы в знаниях заполнены, но в то же время сохранилась возможность для повторения экспериментов.

Когда две трети работы выполнено – время браться за статью.

Подспудный труд исследователя перед написанием статьи предполагает ведение *рабочего журнала*, в котором приведена работа по добыче научного знания: описаны цель эксперимента и порядок его проведения, экспериментальное оборудование и материалы, таблицы с экспериментальными значениями и графики, объяснение зависимостей и выводы. Формулировка промежуточных выводов на этой стадии работы заставляет критически оценить каждый опыт. Возможно, некоторые из опытов придется повторить. Продемонстрируйте Ваши результаты коллегам. Ничто лучше не проясняет идею, как объяснение её другим. Хорошо составленный контекст позволяет увидеть идею с новой точки зрения и лучше ее понять.

Приведенные ранее структурные составляющие статьи по мере работы над ней вызревают постепенно, поэтому их лучше излагать на отдельных непрерывно совершенствуемых *бумажных или электронных носителях*. Если отложить какой-то фрагмент работы на время, а затем его прочитать, то весьма вероятно, что Вы обнаружите положения, которые и сами не поймете.

Уделите особое внимание *стилю изложения*. Используйте устоявшуюся терминологию, желательно из терминологических стандартов. Сложные термины и наименования применяйте по мере надобности, поясняйте значение новых слов. Русский язык богат, его возможности безграничны, поэтому иностранные слова следует употреблять по необходимости (в исключительных случаях). Зачастую молодые учёные стремятся блеснуть своими познаниями, проявляя максимум академичности. В результате тексты становятся наукообразными, трудными для восприятия. Тогда даже коллеги, работающие в смежных областях, могут не понять отдельные части текста и термины.

Скорее всего, такую статью не дочитают до конца.

Величественный стиль в науке непопулярен. Выражайте идеи достаточно эффективно и просто, чтобы облегчить читателю понимание того, о чём Вы пишете, а не поражайте его своей речью, иначе можно попасть под подозрение, что Вам нечего сказать.

Ложь нельзя сказать кратко: она требует громких слов и многих украшений (А.М. Горький).

Слова, не несущие смысловой нагрузки, являются бесполезными, их без сожаления исключайте из текста. Старайтесь, чтобы каждое слово было значащим. В процессе быстрого чтения читатель не настроен возвращаться, чтобы перечитать отрывок. Обнаружить такие места в рукописи можно прочтением ее после «вылеживания».

Делите текст на разделы, абзацы – так он будет лучше восприниматься. Используйте заголовки и подзаголовки. Они помогают сделать статью «читабельной» и указывают читателю на интересующие его части. Если обсуждение слишком длинное, дайте ему подзаголовки, которые должны работать. Если Вы употребили в тексте какую-то идею и хотите это подчеркнуть, попытайтесь включить это понятие в название другими словами. Заголовок может быть в форме вопроса.

Целью изложения материала должна быть передача информации, требующей от читателя минимальных усилий для её усвоения.

Научную статью *ориентируйте* на конкретную аудиторию. Если Ваши данные нужны узкому кругу специалистов, обозначьте это во вступительной части.

Требования различных изданий несколько отличаются друг от друга. Написание научной статьи, её структура, тонкости изложения и оформление должны соответствовать *тому изданию*, в котором Вы собираетесь опубликовать Вашу работу. Ознакомьтесь с кругом публикуемых тем этим изданием.

Следите за изложением. Научная статья не должна выглядеть как набор выдержек из разных исследований с Вашими выводами в конце. Избегайте другой крайности – не пишите текст, напоминающий публицистическую статью или эссе. Научная статья обязательно опирается на фундаментальные исследования, базируется на уже известных достижениях, раскрывая при этом новые факты или наблюдения.

Если Вы только излагаете собственное мнение по проблеме, свои наблюдения, пусть и ценные, но не опираетесь на теоретическую основу, статья перестанет быть научной.

Придерживайтесь чёткой логической структуры, создавая текст работы. В научной статье должна прослеживаться хорошо *сбалансированная композиция*, весь текст выстраивается грамотно: содержание выражается в соответствующей ему форме.

Подумайте, насколько планируемый объём текста соответствует содержанию, которое Вы предполагаете изложить. Лучший вариант – когда в научной статье освещается определённый аспект проблемы, а тема достаточно узкая. Тогда Вы будете иметь возможность привести все детали, рассмотреть тонкости, исследовать проблему подробно и исчерпывающе, полностью раскрыть тему, не оставив пробелов.

Не старайтесь «объять необъятное».

(из К. Пруtkова)

Следите за соответствием заглавия, содержания и выводов, не отходите от рассматриваемого вопроса в сторону. Постарайтесь логично подвести изложение материала к окончательным выводам, грамотно и четко изложить их. Именно выводы содержат основную научную ценность статьи, а наблюдения, аргументы и доказательства лишь подкрепляют их.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Иванов В.П. Периодичность и объем ремонта автомобильных агрегатов.....	2
Голембиевский А.И. Целенаправленная эволюция открытого множества способов обкатного зубодолбления цилиндрических зубчатых колес.....	8
Капшальян И.А., Орукари Б., Дубина Л.М. Стойкость режущего инструмента при многонаправленной токарной обработке на станках с числовым программным управлением.....	16
Михайлов М.И. Влияние геометрических параметров зуба осевого инструмента на его напряженное состояние.....	22
Попок Н.Н., Кунцевич И.П., Хмельницкий Р.С., Анисимов В.С. Моделирование влияния шероховатости сферической поверхности детали на выбор скорости подачи вращающегося режущего инструмента.....	28
Ракицкий А.А. Прогнозирование эксплуатационного ресурса конструкций мобильных машин по результатам рандомизированных стендовых испытаний.....	38
Мажугин Е.И., Рубец С.Г., Пашкевич А.В. Обоснование необходимости использования трапецевидных ножей на роторных косилках.....	44
Алифанов А.В., Цуран В.В., Милюкова А.М. Результаты производственных испытаний рубильных ножей, изготовленных по разработанной технологии.....	51
Голозузов А.Л. Усовершенствование плазмотрона для плазмохимического нанесения тонкопленочных покрытий.....	56
Козловский В.И., Вайтехович П.Е. Измельчение материалов в шаровой мельнице с мешалкой непрерывного действия ...	61

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

Белоцерковский М.А., Сосновский И.А., Куриленок А.А., Кузнецик О.О. Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых покрытий, содержащих наноразмерные модификаторы.....	66
Поляков А.Ю., Фурманов С.М., Бендик Т.И., Степанов А.А., Колобова М.С. Об обеспечении прочности соединений, получаемых способом контактной рельефной сварки, без образования литого ядра.....	75
Волков Ю.В., Лопата В.Н., Вигерина Т.В., Агеев М.С. Восстановление валов дизель-генераторов электроконтактным припеканием дискретных покрытий.....	82
Сенють В.Т., Жорник В.И., Парницкий А.М., Мосунов Е.И., Дудан А.В. Термобарическое спекание модифицированных кремнием и титаном алмазных микропорошков.....	89
Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белоцерковский М.А., Белый А.В. Влияние технологических параметров напыления и ионного азотирования на структуру и износостойкость газотермического покрытия из высокохромистой стали 95X18.....	94
Бойправ О.В., Борботько Т.В., Лыньков Л.М. Радиопоглощающие свойства никелированного порошкообразного перлита.....	100
Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Астапов Е.А. К вопросу формирования структуры и твердости полутеплостойкой стали X12M методами термической и химико-термической обработки.....	107
Черновол М.И., Ворона Т.В., Штемпель О.П., Лопата Л.А. Структурно-фазовые превращения и модифицирование при электроконтактной обработке стальных газотермических покрытий.....	115
Жорник В.И., Ковалева С.А., Хомич Н.С., Григорьева Т.Ф., Дудан А.В., Григорьев С.В. Получение композиционных порошков систем Fe-SiC и Fe-B ₄ C методом механосинтеза.....	123
Белоцерковский М.А., Сосновский А.В., Трусов Д.И., Яловик А.П. Оценка допустимых температур нагрева цилиндрических деталей при напылении металлических покрытий методом гиперзвуковой металлизации с использованием газа МАФ.....	130
Грабарь И.А., Насонова Н.В., Пулко Т.А., Лыньков Л.М. Исследование оптических характеристик композиционных влагосодержащих материалов.....	136

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОХРАНА ТРУДА

Зильберглейт М.А., Шевчук М.О., Флейшер В.Л., Якубовский С.Ф. Модифицированная методика определения числа компонентов в растворе.....	141
Покровская С.В., Кудряцев В.В. Влияние состава смешанного растворителя N-метилпирролидон–триэтиленгликоль–вода на качество получаемых экстракта и рафината при проведении процесса экстракции ароматических углеводородов из риформатов.....	147
Суховило Н.П., Ткачев С.М. Особенности структуры и свойств дорожных битумов, полученных по различным технологиям.....	153
Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Казак Е.В. Сравнительная оценка растворяющей способности углеводородов и спиртов по отношению к нафталину.....	160
Зильберглейт М.А., Маевская О.И. Использование метода цветометрии для контроля концентрации спирторастворимых красителей.....	164
Иванов В.П., Дронченко В.А. Обоснование технических решений, связанных с охраной труда и окружающей среды.....	168
Покровская С.В., Булавка Ю.А., Галкина Д.В. Моделирование последствий аварий на опасных производственных объектах нефтеперерабатывающей промышленности с использованием программного комплекса ТОХI ^{+Risk}	173
Мисун А.Л. Прогнозируемая травмоопасность при восстановлении работоспособности кормоуборочных комбайнов.....	179
Семенов В.И., Дронченко В.А. Снижение выбросов оксидов азота при работе котельных установок.....	185
Сафронова Е.В., Спиридонов А.В., Митинов А.В. Конструирование и расчет эффективных струйных аппаратов системы «жидкость – газ».....	190

ИНФОРМАЦИЯ

Иванов В.П. Как написать научную статью (структура материала и организация работы).....	195
--	-----