

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 ПОЛОЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаванне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, хімічнай тэхнікі і тэхналогіі.

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, химической техники и технологии.

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.

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.

Редакторы Р.Н. Авласенок, О.Л. Чалова. Техн. редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 24.02.2012. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Гарнитура Times New Roman.
Ризография. Усл. печ. л. 16.04. Уч.-изд. л. 19,34. Тираж 100 экз. Заказ 289.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.91.04

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗА КИНЕМАТИКИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ОБРАБОТКИ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

д-р техн. наук, проф. В.А. ДАНИЛОВ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматриваются основные задачи синтеза кинематики формообразования и кинематических схем обработки поверхностей на этапе функционального проектирования формообразующих систем станков. Упрощение кинематики станка и повышение его кинематической точности обеспечивают: синтез структуры исполнительных движений, создающей благоприятные условия процесса обработки и работы механизмов станка путем исключения реверсивных движений; совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности; введение дополнительных движений; задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений или регулирование их скорости для управления формообразованием и условиями резания; рациональное распределение элементарных движений между исполнительными органами станка для обеспечения его универсальности.

Постановка задачи. Функциональное проектирование станочного оборудования включает этапы концептуального и схематического проектирования [1], завершаемые применительно к механике станка разработкой его кинематической структуры и принципиальной кинематической схемы. Эти задачи решаются на основе синтеза общей схемы обработки поверхности [2], кинематики формообразования и кинематической схемы обработки. Принимаемые на этих этапах решения носят принципиальный характер и их недостатки не могут быть устранены или компенсированы на последующих этапах проектирования и конструирования станка. Разработка кинематики формообразования и кинематической схемы обработки, выполняемая на основе принятой общей схемы обработки, относится к концептуальному проектированию станочного оборудования, определяющему принцип построения и функционирования формообразующей системы станка. Основные задачи синтеза кинематики формообразования и кинематической схемы обработки – *задание*, исходя из реализуемого метода формообразования поверхности, рационального распределения функции формообразования между инструментальной и кинематической подсистемами станка; *определение* количества, структуры и параметров исполнительных движений; *распределение движений* между исполнительными органами станка; *оценка* влияния формы материального носителя производящих линий на конструкцию инструмента и станка и др. Кинематика формообразования и кинематическая схема обработки, являясь основой схематического проектирования станка, в значительной степени определяют его производительность, универсальность и другие технико-экономические характеристики, поэтому разработка методологических основ решения указанных задач имеет практическое значение.

Рассмотрим некоторые аспекты этой проблемы исходя из основных положений теории формообразования поверхностей и проектирования кинематики станочного оборудования.

Основы синтеза кинематики формообразования. Методологической основой синтеза кинематики формообразования выступает положение теории формообразования поверхностей, согласно которому формирование поверхности включает воспроизведение производящих линий (образующей и направляющей) и их относительное перемещение [3]. При этом каждая из этих линий может быть образована или одним из простых методов (копирования, следа, касания, обката) [4], или их сочетанием [5], а методы формообразования поверхности в целом представляют возможные сочетания методов формообразования производящих линий. Чем больше методов формообразования реализуется станком, тем шире его технологические возможности (универсальность) по форме обрабатываемых поверхностей.

Кинематика формообразования производящей линии зависит от типа материального носителя ее формы, которым в зависимости от распределения функции формообразования между компоновочной, кинематической и инструментальной подсистемами станка может быть производящий элемент инструмента (точка, линия или поверхность), кинематика и компоновка станка или их сочетание. Поэтому от выбора метода формообразования зависит сложность инструмента и станка. При методах копирования и обката производящим элементом является линия, однако в первом случае для ее образования движение формообразования не требуется, а материальным носителем формы линии служит инструмент. Во втором случае линия формируется в результате сложного относительного движения производящего элемента как

огибающая множества его положений. Материальным носителем формируемой линии в этом случае являются инструмент и кинематика станка, благодаря чему одним инструментом можно обрабатывать различные поверхности. По сравнению с методом копирования форма инструмента упрощается, а формообразующая система станка усложняется. В общем случае при перенесении функции кинематики формообразования на инструмент механика станка упрощается, а конструкция инструмента усложняется.

Наибольшая универсальность схемы формообразования обеспечивается при методах следа и касания благодаря тому, что производящим элементом является точка, которой для образования производящей линии в первом случае требуется сообщить одно, а во втором – два движения формообразования. Материальным носителем формируемой линии в этих случаях служит только кинематика станка, что и обеспечивает его универсальность. Следует иметь в виду, что хотя при методе касания требуется на одно движение формообразования больше, чем при методе следа, однако в последнем случае часто для стабилизации рабочих углов инструмента требуется движение ориентации, усложняющее кинематическую схему обработки.

Технологические возможности станка по форме обрабатываемых поверхностей существенно расширяются при реализации управляемых кинематических схем обработки, что обуславливает необходимость их разработки при проектировании формообразующей системы. Управление схемами формообразования для обеспечения заданной траектории исполнительного движения достигается настройкой соотношения скоростей и направлений элементарных движений, образующих исполнительные движения, геометрических параметров схемы обработки, относительного расположения и перемещения траекторий элементарных движений и т.д., то есть кинематическими и геометрическими методами [6]. Управление кинематическими методами заключается в обеспечении требуемого соотношения скоростей движений исполнительных органов станка за счет кинематической настройки, копировальных устройств, механизмостроителей или программных средств. Наиболее простым в реализации и наиболее точным является метод кинематической настройки (кинематического профилирования), особенно если требуемая траектория движения формообразования создается согласованными постоянными по скорости и направлению движениями исполнительных органов станка. В этом случае исключаются ошибки формирования образуемой линии, имеющие место при других методах, обусловленные, например, неточностью изготовления копира и работы копировальной системы или программированием координат только отдельных точек этой линии.

Следует отметить, что метод кинематического профилирования применим не только для точного, но и для приближенного формирования производящих линий, например, когда заданная линия заменяется другой, легко формируемой, линией.

Требуемое согласование движений исполнительных органов при кинематическом профилировании производящих линий может обеспечиваться в станке не только механическими, но и электромеханическими, и мехатронными кинематическими связями [7]. Отличие последнего случая от метода формирования производящей линии программными средствами состоит в том, что задаются не координаты отдельных ее точек, а скорости движений исполнительных органов. В этом случае согласование скоростей движений осуществляется простыми техническими средствами (устройствами с настраиваемым передаточным отношением, программируемыми контроллерами и т.п.).

Изменением соотношения скоростей и направлений элементарных движений, образующих движение формообразования, обеспечивается управление траекторией этого движения для ее приближения с требуемой точностью к принадлежащей номинальной поверхности производящей линии. Кинематическое управление формой производящих линий через параметры исполнительных движений (траекторию, скорость, направление, исходное положение, путь), а также за счет относительного и абсолютного геометрического положения траектории движения значительно расширяет технологические возможности схем обработки по форме поверхностей без введения дополнительных движений, т.е. без усложнения кинематики формообразования и, соответственно, станка. Такое управление является универсальным методом формирования сложных поверхностей. Оно широко применяется, например, в схемах кинематического профилирования, основанных на двух согласованных по скорости и направлению элементарных движениях. В этом случае траектория исполнительного движения представляет циклоидальную линию, которая в зависимости от кинематических и геометрических параметров схемы формообразования может быть прямой, окружностью, эллипсом и более сложными по форме кривыми [8]. Изменением относительного расположения плоскостей вращательных движений достигается модификация этих кривых, что расширяет технологические возможности схемы формообразования без введения дополнительных движений [5]. Управляемые схемы формообразования расширяют технологические возможности станков без усложнения их кинематики. Реализация таких схем с применением в обобщенных случаях числового программного управления еще в большей степени повышает универсальность станочного оборудования и упрощает осуществление движений с переменными параметрами.

Кинематика формообразования в общем случае обусловлена одновременностью осуществления множества взаимосвязанных элементарных движений, создающих исполнительные движения. Учитывая, что одна и та же линия может быть получена различными по структуре движениями, важно обоснованное задание структуры движения исходя из ее влияния на условия резания и работы механизмов станка.

Задание структуры и определение количества исполнительных движений. Формообразующая обработка основана на сообщении инструменту и заготовке относительных исполнительных движений формообразования (Φ), врезания (Bp), деления (D), а также установочных (Ucm) и вспомогательных (Bcn) перемещений [4]. Простые и сложные исполнительные движения создаются соответственно одним или несколькими взаимосвязанными элементарными движениями (вращательное B , поступательное $П$, качательное K), которые сообщаются инструменту и (или) заготовке.

Структура исполнительных движений в наибольшей степени зависит от формы создаваемой линии и метода ее формообразования. Для упрощения исполнительных движений и их реализации на станке производящие линии заданной поверхности обычно принимают плоскими или расположенными на поверхностях вращения в соответствии с координатными перемещениями исполнительных органов станка. Основой кинематики формообразования служит принятый метод получения поверхности, определяемый сочетанием возможных методов образования её производящих линий, каждый из которых реализуется определенным количеством движений. Так, для образования линии методом следа требуется одно движение формообразования, методом касания – два движения, методом обката – одно сложное движение, при методе копирования вместо движения формообразования выполняется установочное движение, в частном случае движение врезания.

С учётом этого и геометрических моделей процессов формообразования могут быть построены кинематические модели, отражающие структуру исполнительных движений, которая в наибольшей степени зависит от формы создаваемой линии (плоская или пространственная) и метода ее формообразования. Для упрощения исполнительных движений производящие линии целесообразно принимать плоскими или расположенными на поверхностях вращения в соответствии с координатной системой станка.

Плоская линия может быть образована методом следа одним или двумя элементарными движениями B , $П$, O и K . При дополнительных требованиях (повышение точности формообразования, стабилизация рабочих углов инструмента) в структуру исполнительного движения вводится соответствующее движение, например ориентирующее.

Неплоская линия, расположенная на цилиндрической поверхности вращения, образуется исполнительными движениями ($BП$), (BO) и ($BΠO$) при условии, что элементарные движения $П$ и O направлены вдоль образующей цилиндрической поверхности. Неплоские линии на конических поверхностях вращения образуются, если движения $П$ и O направлены вдоль образующей поверхности (обеспечивается компоновкой станка), а также за счёт введения движения $Π_2$ для изменения радиуса конической поверхности, т.е. исполнительными движениями ($BΠ_1Π_2$), ($BOΠ_2$), ($BΠ_1OΠ_2$). Такими же комбинациями элементарных движений образуются неплоские линии, расположенные на поверхностях вращения с криволинейной образующей, а также линии, принадлежащие сложнопрофильным поверхностям, при сообщении вращательного движения заготовке. Приведенные модели кинематики формообразования в общем случае дополняются движениями ориентации.

Универсальная кинематическая модель формообразования пространственных линий произвольной формы основана на движении ($Π_1Π_2Π_3B_1B_2$), в котором движения $Π_1$, $Π_2$ и $Π_3$ обеспечивают перемещение производящего элемента в декартовой системе координат, а движения B_1 и B_2 служат для ориентации инструмента относительно заданной номинальной поверхности изделия.

Кинематические модели формообразования производящих линий методом касания отличаются от рассмотренных независимым движением резания Φ_v (обычно вращательным) для образования дополнительных траекторий производящих элементов инструмента, формирующих заданную производящую линию.

Кинематика формообразования производящих линий методом обката обусловлена относительным перемещением аксоидов [9]. В зависимости от формы аксоидов их относительное перемещение создается определенной комбинацией взаимосвязанных элементарных движений: ($BΠ$) – для цилиндрического и плоского аксоидов; (BB) – для цилиндрических, конических и гиперболических аксоидов вращения; ($BВΠ$) – если один из аксоидов имеет некруглую форму. Кинематика формообразования поверхности определяется совокупностью движений, количество которых

$$H = H_O + H_H - 0,5H_C, \quad (1)$$

где H_O , H_H – количество движений для формирования соответственно образующей и направляющей; H_C – количество совмещенных движений.

С учетом геометрической и временной моделей процессов формообразования линий

$$H_O = H_{O\Phi} + H_{OB}; \quad H_H = H_{H\Phi} + H_{HB},$$

где H_{OB} , H_{HB} – количество движений для реализации метода генерации линии во времени; $H_{H\Phi}$, H_{HB} – количество движений для получения их формы.

Совмещенным является движение, обеспечивающее формирование одновременно обеих производящих линий.

Для упрощения кинематики станка важно, чтобы его технологические возможности обеспечивались минимальным количеством движений. Возможность минимизации количества движений формообразования ограничивается следующими факторами:

- методами формообразования производящих линий;
- разделением заданной поверхности на элементарные поверхности;
- выбором простой по форме образующей из двух производящих линий формируемой поверхности;
- формой производящего элемента, его положением и направлением перемещения в координатной системе станка;
- возможностью совмещения движений и др.

Оптимизация структуры исполнительных движений. Сложность кинематики формообразующей системы станка обусловлена количеством и структурой необходимых исполнительных движений. Задание и оптимизация их структуры – одна из основных задач синтеза кинематики формообразования при проектировании станка. Многообразие возможных решений обусловлено тем, что одна и та же линия может быть образована различными сочетаниями движений. Например, окружность обычно формируется одним вращательным движением. При обработке же отверстий в неподвижных деталях (например, фрезерованием, а также при раскросе материала плазменной, лазерной, гидроабразивной и другими видами резки) окружность обычно получают двумя согласованными прямолинейными реверсивными движениями. Данные схемы образования окружности неравнозначны по сложности их реализации и влиянию

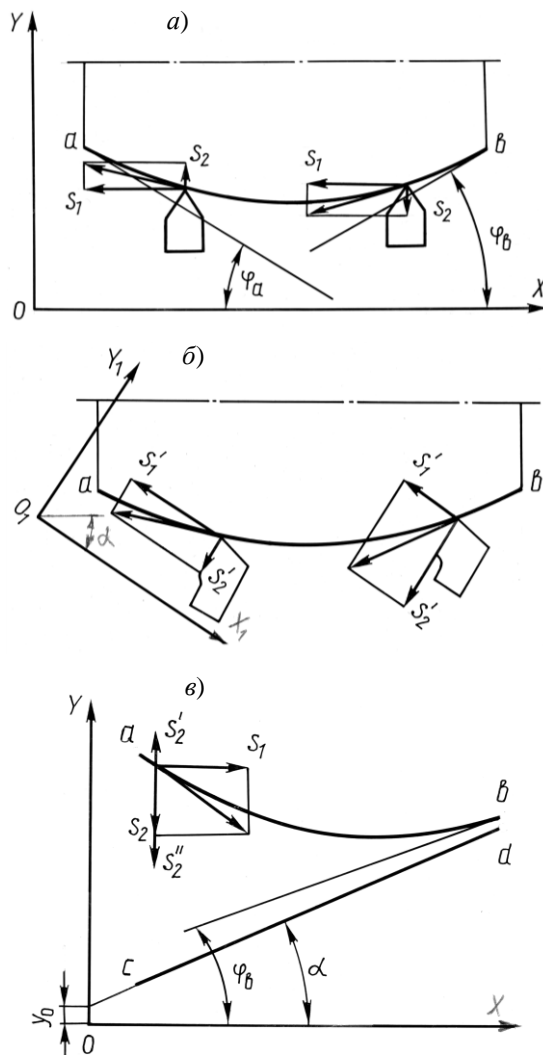


Рис. 1. Схемы формообразования криволинейной производящей линии реверсивным элементарным движением (а), не реверсивными движениями (б), при дополнительном движении (в)

на динамику работы исполнительных механизмов станка. В этой связи выбор из множества возможных рационального сочетания элементарных движений представляет один из путей оптимизации кинематики формообразования и структуры исполнительных движений.

Если исполнительное движение осуществляется со скоростью резания, что имеет место при образовании профиля методом следа, то зачастую для образования производящей линии предпочтительно сочетание нереверсивных движений, обеспечивающих по сравнению с реверсивными более высокие производительность и точность обработки. Таким образом, в общем случае предпочтительны комбинации нереверсивных движений, обеспечивающих более высокую производительность и точность обработки.

Реверсивные элементарные движения могут быть исключены геометрическим и кинематическим методами. Рациональная структура исполнительного движения геометрически может быть обеспечена путем выбора системы координатных перемещений [5]. Например, образование линии ab , имеющей точку перегиба, в системе координат XOY двумя ортогональными перемещениями S_1 и S_2 производящей точки возможно лишь при переменном по направлению перемещении S_2 (рис. 1, а). Это характерно для традиционной схемы получения криволинейных поверхностей на станках с копировальной или числовой системами управления. Наличие переменной по направлению поперечной подачи отрицательно влияет на точность обработки из-за погрешности, обусловленной реверсированием исполнительного органа станка.

Та же линия в системе X_1Y_1 , повернутой на угол α относительно системы XOY , образуется неизменными по направлению перемещениями S_1' и S_2' (рис. 1, б), если $|\alpha| \geq |\varphi_{\max}|$, где φ_{\max} – максимальное значение угла между положительными направлениями кривой и осью абсцисс. В данном случае образующая ab номинальной поверхности создается движением $\Phi_3(P_2P_3)$, поэтому

исключаются влияние на точность формообразования зазоров в кинематической цепи привода подачи, различия в упругих деформациях её элементов в противоположных направлениях, нечувствительность копирующей следящей системы.

Кинематически реверсивное движение может быть исключено сложением противоположно направленных движений, одно из которых осуществляется с постоянной, а другое – с переменной скоростью. Например, в каждый момент времени перемещение S_2 производящей точки при образовании линии ab , уравнение которой $y = f(x)$, можно представить как $S_2 = S_2' - S_2''$, где $S_2' = y_0 + xtg\alpha$ – перемещение этой точки по линии cd (рис. 1, в); $S_2'' = y_0 + xtg\alpha - f(x)$, $|\alpha| \geq |\alpha_{\max}|$. Однако для сообщения инструменту таких движений необходимы два исполнительных органа, что усложняет конструкцию станка и снижает его жесткость.

Реверсивное поступательное движение может быть исключено также заменой его вращательным. Рассмотрим этот метод на примере обработки бочкообразных зубьев дисковым инструментом. Их профилирование осуществляется копированием, а формообразование по длине – методом касания движениями $\Phi_V \langle B_1 \rangle$ и $\Phi_S \langle I_2 O_3 \rangle$ (рис. 2, а). Последовательность обработки зубьев обеспечивается периодическим поворотом B_4 заготовки. Движением O_3 расстояние между осями заготовки 1 и инструмента 2 изменяется в соответствии с заданной бочкообразностью зубьев. Изменение указанного расстояния возможно также при сообщении инструменту вращения B_3 вокруг оси, параллельной её геометрической оси (рис. 2, б). В данном случае движение подачи $\Phi_S \langle I_2 B_3 \rangle$ создается нереверсивными элементарными движениями.

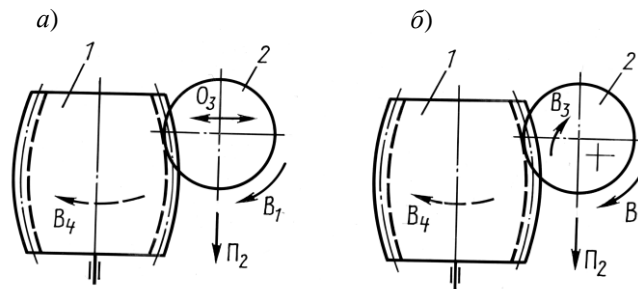


Рис. 2. Схемы формообразования бочкообразных зубьев с реверсивным относительным движением инструмента (а); с планетарным движением инструмента (б)

Вращательным движением можно заменить также два возвратно-поступательных. Например, образование окружности методом касания в неподвижных заготовках возможно по схемам $\Phi(O_1 O_2)$ или $\Phi(B)$. Первая характерна для станков с копирующими и числовыми системами управления, вторая применяется в станках с планетарным движением шпинделя. Движение B во второй схеме выполняет ту же функцию, что движения O_1 и O_2 в первом случае.

Замена сложного движения $\Phi(O_1 O_2)$ простым $\Phi(B)$ упрощает кинематическую схему обработки. Однако первая схема более универсальна, так как движением $\Phi(O_1 O_2)$ могут быть образованы не только окружности, но и различные циклоидальные кривые. Поэтому при синтезе структуры исполнительного движения должны учитываться конструктивные и технологические факторы.

Для обеспечения эффективных условий резания наряду с необходимыми для формообразования заданной поверхности движениями инструменту и (или) заготовке могут сообщаться дополнительные макро- или микродвижения. На этом основаны осциллирующее сверление, точение, шлифование и другие прогрессивные методы обработки. Необходимость в дополнительных движениях при обработке сложных поверхностей часто обусловлена их геометрией. Например, для образования плоской линии 1 (рис. 3) методом следа достаточно сообщить производящей точке \tilde{N} (вершине резца 2) согласованные движения Π_1 и Π_2 так, что в каждый момент времени исполнительное движение $\Phi \langle \Pi_1 \Pi_2 \rangle$ направлено по касательной τ . Однако передний γ_i и задний α_i рабочие углы резца непрерывно изменяются, что обуславливает переменные условия резания и ограничивает технологические возможности схемы обработки по форме образуемых поверхностей допустимым диапазоном изменения указанных углов. Это ограничение исключается при сообщении резцу

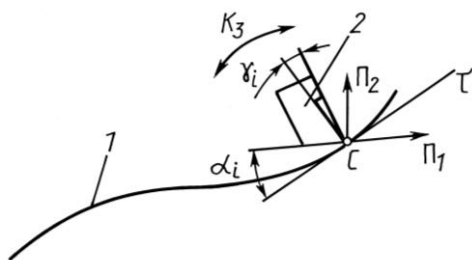


Рис. 3. Схема формообразования линии с ориентирующим движением инструмента

дополнительного качательного движения K_3 вокруг точки C для стабилизации рабочих углов режущей части. Оно является ориентирующим движением $Op K_3$, параметры которого взаимосвязаны с движением формообразования. Если движение K_3 сообщается относительно другой точки, то оно изменяет форму линии, создаваемой движениями Π_1 и Π_2 . Поэтому в данном случае оно входит в структуру движения формообразования $\Phi_v \langle \Pi_1 \Pi_2 K_3^{op} \rangle$, причем параметры движений Π_1 и (или) Π_2 отличаются от параметров этих движений в схеме $[\Phi_v \langle \Pi_1 \Pi_2 \rangle, Op K_3]$. Ориентирующая функция движения K_3 сохраняется, что отражено в его обозначении.

Наличие ориентирующего движения улучшает условия резания и расширяет технологические возможности схемы обработки, поэтому учет данного обстоятельства представляет один из путей синтеза рациональных схем формообразования сложных поверхностей.

Совмещение исполнительных движений. Совмещение исполнительных движений одинакового или различного функционального назначения (формообразования, деления, ориентации и др.) позволяет упростить исходную кинематическую схему обработки. На этом принципе основаны, например, широко применяемые схемы обработки зубчатых колес с образованием профиля зубьев методом обката, характерным для которых является совмещение сложного движения обкатки, обеспечивающего профилирование нарезаемых зубьев, с движением деления. Благодаря этому зубонарезание осуществляется непрерывно, что повышает производительность процесса.

Для формообразования производящей линии необходимы движения профилирования и резания, т.е. движения, сообщаемые инструменту относительно заготовки для получения формы этой линии и срезания с заготовки слоя металла. Эти движения могут выполняться отдельно или быть совмещенными в одно движение. Совмещение движений в этом случае обычно связано с перенесением функции формообразования на инструмент, что упрощает кинематическую, но усложняет инструментальную подсистемы обрабатываемой системы станка, а также ограничивает возможности управления формообразованием. Например, нарезание узких цилиндрических колес методом обката гребенчатой фрезой 1 (рис. 4, а), когда заготовке 2 сообщается вращение B_2 , согласованное с её относительным перемещением Π_3 вдоль оси вращения фрезы, осуществляется независимыми (разделенными) движениями – главным $\Phi_v(B_1)$ и подачи (профилирования) $\Phi_s(B_2 \Pi_3)$. Возможность независимого управления скоростью каждого из этих движений позволяет управлять высотой огранки, образуемой на боковых сторонах зубьев.

При совмещении указанных исполнительных движений и перенесении функции кинематики формообразования на режущий инструмент данная схема обработки упрощается. Поэтому для нарезания тех же колес червячной фрезой (рис. 4, б) требуется только одно исполнительное движение $\Phi_{v,s}(B_1 B_2)$, поскольку движение Π_3 обеспечивается не кинематически, а конструкцией инструмента. В результате кинематическая схема обработки упрощается, а конструкция инструмента усложняется, и исключается возможность кинематически управлять высотой огранки обработанных поверхностей зубьев.

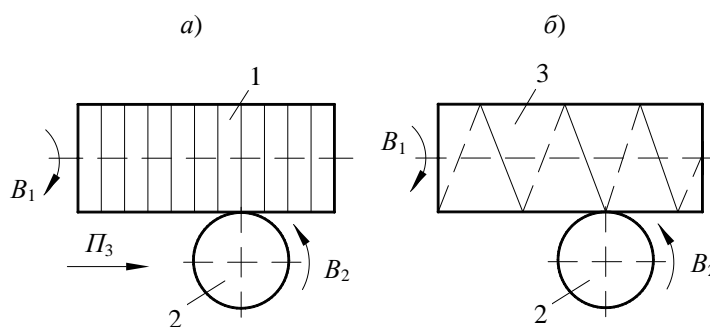


Рис. 4. Схемы нарезания зубчатого колеса при разделенных (а) и совмещенных (б) движениях профилирования и резания

В обоих случаях одновременно с профилированием непрерывно происходит процесс деления, который осуществляется за счет вращения B_2 заготовки. Таким образом, движение деления $D(B_2)$ совмещено с движением $(B_1 B_2)$ профилирования зубьев. Совмещение исполнительных движений наиболее эффективно, если оно не связано с усложнением конструкции инструмента.

Задание рационального сочетания скоростей элементарных движений. Для реализации сложного исполнительного движения с требуемыми параметрами требуется определенная функциональная связь скоростей элементарных движений. В большинстве случаев предпочтительны как более простые в реализации плоские или расположенные на поверхностях вращения производящие линии. Соотношение скоростей элементарных движений при образовании плоской линии двумя прямолинейными движениями по взаимно перпендикулярным направлениям обусловлено ориентацией скорости результирующего движения по касательной к образуемой линии. Если линия $y = f(x)$ образуется точкой, имеющей скорость $v = v(t)$, где t – время, то её криволинейное движение разлагается на два прямолинейных: $x = f_1(t)$ и $y = f_2(t)$, скорости которых соответственно $v_x = f_1'(t)$ и $v_y = f_2'(t)$. Скорость v направлена по касательной к траектории результирующего движения, поэтому

$$v_x = v y'_x / \sqrt{1 + y'_x{}^2}, \quad (2)$$

$$v_y = v / \sqrt{1 + y'_x{}^2}. \quad (3)$$

Интегрированием выражений (2) и (3) находятся уравнения элементарных движений $x = f_1(t)$ и $y = f_2(t)$, осуществляемых кинематикой станка. Аналогично определяются скорости для иных сочетаний элементарных движений: $(BП)$, (BB) и других.

Скорость движения формообразования оказывает существенное влияние на производительность обработки и стойкость инструмента, поэтому задание соотношения параметров элементарных движений, обеспечивающих стабилизацию скорости исполнительного движения или изменение её по определенному закону, является необходимым этапом синтеза рациональной кинематики формообразования и представляет путь её оптимизации.

Для стабилизации скорости движения формообразования искомые значения v_x , v_y , $f_1(t)$ и $f_2(t)$ определяются исходя из выражений (2) и (3) при $v = const$.

Распределение элементарных движений между инструментом и заготовкой. Кинематика формообразования может быть реализована множеством кинематических схем обработки, каждая из которых при одинаковых исполнительных движениях отличается распределением составляющих их элементарных движений между инструментом и заготовкой. Например, формообразование цилиндрической поверхности в зависимости от распределения исполнительных движений $\Phi_v(B_1)$ и $\Phi_s(\Pi_2)$ между резцом и заготовкой возможно четырьмя кинематическими схемами обработки:

- 1) оба движения сообщаются заготовке (обработка на автоматах продольного точения);
- 2) движение B_1 сообщается заготовке, Π_2 – резцу (обработка на универсальных токарных станках);
- 3) движение B_1 сообщается резцу, Π_2 – заготовке (обработка на бесцентровых токарных станках);
- 4) оба движения сообщаются резцу (обработка на специальных станках шеек коленчатых валов).

Каждая из данных схем имеет область эффективного применения.

От распределения движений зависят компоновка, универсальность, жесткость и другие характеристики станка, поэтому кинематическая схема обработки должна приниматься на основе анализа возможных вариантов распределения элементарных движений между исполнительными органами станка с учётом технологических и конструктивных факторов.

В большинстве случаев предпочтительно сообщать движения одновременно инструменту и заготовке, чем одному из них сложного движения, например планетарного, так как кроме упрощения конструкции улучшаются динамические условия работы станка и расширяются его технологические возможности. Учитывая это, иногда целесообразно простое или одно из элементарных движений разлагать на два, которые сообщаются инструменту и заготовке навстречу друг другу. В данном случае хотя и усложняется кинематика станка, однако существенно уменьшаются значения абсолютных значений скоростей исполнительных органов. Например, разложение простого вращательного движения $\Phi(B)$ на два, сообщаемых одно сверлу, а второе – заготовке в противоположных направлениях, позволяет при той же скорости резания в 2 раза уменьшить значения частот вращения исполнительных органов станка. Аналогично, при строгании и долблении исполнительное поступательное движение $\Phi_v(\Pi)$ может быть разложено на два элементарных, сообщаемых одновременно инструменту и заготовке для уменьшения динамических нагрузок в исполнительных механизмах станка.

Изложенные принципы построения общих схем обработки и кинематики формообразования составляют основу модели синтеза кинематических схем обработки, которая в структурном виде представлена на рисунке 5. Связывая схему формообразования поверхности, метод обработки, технологическую компоновку и кинематическую подсистему формообразующей системы станка, она служит основой для проектирования его кинематической структуры и кинематической схемы.



Рис. 5. Алгоритм синтеза кинематической схемы обработки

Заключение. Проведенное исследование показало, что общими принципами синтеза рациональных кинематики формообразования и кинематических схем обработки при проектировании станочного оборудования являются:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент, что обеспечивает упрощение кинематики станка и повышение его кинематической точности;
- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет исключения геометрическим или кинематическим методами реверсивных движений исполнительных органов, замены возвратно-поступательных движений вращательными;
- совмещение исполнительных движений для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;
- разделение исполнительных движений для обеспечения возможности независимого управления ими с целью оптимизаций условий резания, повышения качества обработки;
- введение дополнительных движений, задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений или регулирование их скорости для управления точностью формообразования, схемой и условиями резания;
- рациональное распределение элементарных движений между исполнительными органами станка для обеспечения его универсальности.

Рассмотренные принципы построения кинематики формообразования и кинематических схем обработки являются универсальными при создании и модернизации специального и многофункционального станочного оборудования для обработки различных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, Г.Н. Автоматизация проектирования металлорежущих станков / Г.Н. Васильев. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.
2. Данилов, В.А. Синтез рациональных общих схем обработки при проектировании станков / В.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 89 – 96.
3. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 257 с.
4. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
5. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
6. Данилов, В.А. Общие принципы управления формообразованием при обработке резанием / В.А. Данилов, В.А. Терентьев // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 20: в 2-х т. Т. 1; под ред. И.П. Филонова. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – С. 21 – 26.
7. Данилов, В.А. Синтез внутренних связей кинематических групп при проектировании металлорежущих станков / В.А. Данилов // Машиностроение: республ. межведомств. сб. науч. тр. Вып. 25. – Минск: БНТУ, 2010. – С. 312 – 318.
8. Данилов, В.А. Кинематическое формирование производящих линий поверхности при обработке резанием на базе циклоидальных кривых / В.А. Данилов, Л.А. Данилова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2004. – № 12. – С. 44 – 53.
9. Родин, П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П.Р. Родин. – Киев: Вища школа, 1977. – 192 с.

Поступила 16.12.2011

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE SYNTHESIS OF SHAPING KINEMATICS AND KINEMATIC SCHEME TREATMENT IN THE COURSE OF FUNCTIONAL DESIGN OF MACHINE-TOOL EQUIPMENT

V. DANILOV

Basic tasks of the synthesis of shaping kinematics and kinematic scheme treatment at the functional design phase of shape-generating machine systems are considered. It is shown that simplification of the machine kinematics and improvements of its enduring accuracy provide the following: structure synthesis of slave movements, creating favorable conditions for treatment process and for work of the machine mechanism by exception of reverse motion; combination of slave movements for simplicity of kinematic scheme treatment and efficiency improving; added movements introduction; assignment of rational combination of rates and directions of elementary motions or regulation of their rates for managing of shaping and cutting conditions; rational distribution of elementary motions between machine final elements to provide its versatility.

УДК 656.13.05

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
В ГОРОДЕ НОВОПОЛОЦКЕ**

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ
(Полоцкий государственный университет);
Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ, Н.В. АРТЮШЕВСКАЯ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматриваются вопросы совершенствования организации дорожного движения. Анализ условий движения в Новополоцке с учетом особенностей транспортной планировки города показал, что движение маршрутных транспортных средств оказывает существенное влияние на условия движения транспортных потоков. Представлены разработанные на основе проведенных исследований предложения по совершенствованию дорожного движения в городе Новополоцке: развитие транспортной сети города; улучшение условий движения; повышение качества дорожного покрытия; оптимизация и введение светофорного регулирования и пр. Реализация предложений будет способствовать повышению безопасности и качества дорожного движения в целом, совершенствованию системы транспортного обслуживания, развитию светофорного регулирования.

Город Новополоцк сформирован и развивается по генеральному плану, в котором были предусмотрены необходимые параметры основной улично-дорожной сети (УДС), поэтому геометрические характеристики проезжей части на перегонных участках магистральной УДС в настоящее время практически не нуждаются в изменении. Основная проблема на перегонных участках магистральных улиц – занятость правых полос припаркованными транспортными средствами. Для устранения этих помех при возросшем уровне автомобилизации необходимо увеличение количества парковочных мест вне пределов проезжей части, особенно на территориях, прилегающих к крупным объектам тяготения. Еще одним рациональным направлением развития магистральной УДС в городе является увеличение числа улиц с трамвайным полотном для организации трамвайного движения, обслуживающего пассажирские перевозки по жилой территории города и не требующего обязательного выезда подвижного состава в промзоны.

В настоящее время трамвайная линия проложена по краю основной части жилой застройки, поэтому основная часть пассажиров перевозится автобусами, следующими по улице Молодежной, которая расположена в середине жилой застройки. Кроме того, перевозки на трамвае возможны только в направлении «город – юго-западная промзона», с малым числом остановочных пунктов в зоне жилой застройки, а также с большим интервалом движения, единым для всей линии.

Для привлечения городских пассажиров необходимо продлить трамвайную линию в восточном направлении, в сектор 3 «Подкастельцы – Василевцы», и в западном – в район больничного городка (пересечение улиц Слободской и Гайдара), с созданием двух новых разворотных колец на территории основной жилой застройки. В перспективе следует провести дополнительные исследования и обосновать продление трамвайной линии до района Задвинье в г. Полоцке (левобережная часть).

Новые трамвайные линии в г. Новополоцке целесообразно предусмотреть только на обособленном полотне и проложить их: в западном направлении – по улице Слободской; в восточном направлении – по улице Олимпийской и участку улицы Молодежной – от Олимпийской до улицы Василевцы.

Трассировка линии по улице Олимпийской (а не по Заводскому проезду) позволит обеспечить пешеходную доступность к остановочному пункту трамвая для жителей восточной части сектора района пересечения улиц Молодежной и Олимпийской. Кроме того, в районе этого перекрестка целесообразно разместить еще одно разворотное кольцо трамвая, для поддержания разной частоты движения на участках «Больничный городок – Олимпийская» и «Олимпийская – Василевцы».

При сооружении новых трамвайных линий могут быть организованы несколько новых маршрутов трамвая (дополнительно к существующему): «Больничный городок – Василевцы»; «Больничный городок – Олимпийская»; «завод “Полимир” – Василевцы». В результате появится возможность несколько уменьшить транспортную нагрузку на улицу Молодежную за счет сокращения интенсивности движения маршрутных автобусов, а также привлечь часть городского населения к перемещениям по городу на трамвае вместо использования личных автомобилей.

На скоростной дороге необходимо ликвидировать нерегулируемые пешеходные переходы (в основном путем организации светофорного регулирования), а также откорректировать размещение остановочных пунктов трамвая встречных направлений для уменьшения числа пешеходных переходов.

Требуются также организационно-нормативные мероприятия: *проведение классификации УДС с определением категории каждой из улиц (характерных участков улиц) для корректного применения требований других нормативных документов (СТБ 1140-99, СТБ 1300-2007 и т.д.); реализация требований действующих нормативов по обеспечению требуемого числа стояночных мест возле объектов*

культурно-развлекательного, научно-образовательного, промышленного, делового и торгового значения; улучшение условий движения маршрутных транспортных средств, в том числе сочлененных автобусов; разработка программы развития трамвайного движения в Новополоцке для повышения доли этого вида транспорта в обеспечении пассажирских перевозок по территории города, а не только в сообществе «город – юго-западная промзона».

Планировочное развитие узловых пунктов магистральной улично-дорожной сети. При проектировании новых узловых пунктов УДС или реконструкции существующих недопустимо принятие планировочных решений для регулируемых перекрестков в одном уровне, которые потребуют применения четырехфазных схем светофорного регулирования. Следует также избегать применения трехфазных схем в узлах с интенсивностью движения на входах более 800...900 ед./ч.

На пересечении улиц Калинина и Молодежной в связи с высокой транспортной нагрузкой необходимо обеспечить увеличение пропускной способности. Достижение этой цели возможно несколькими путями: изменение схемы светофорного регулирования; планировочные изменения для узла в одном уровне; реконструкция узла в развязку в разных уровнях.

Изменение планировочного решения с увеличением числа полос, но с сохранением четырехфазной схемы светофорного регулирования, обеспечит повышение пропускной способности примерно на 10...20 %. При этом увеличится ширина проезжей части, которую необходимо преодолеть пешеходам, и, соответственно, время переходного интервала для них в светофорном регулировании. Поэтому при таком решении обязательным является устройство островков безопасности для пешеходов, а также реконструкция существующих направляющих островков для трассировки всех пешеходных переходов через них.

На путепроводе через скоростную дорогу в районе улицы Ктаторова необходима реконструкция въезда со стороны промзоны для обеспечения движения маршрутных автобусов через путепровод и ликвидации режима частичного одностороннего движения на участке скоростной дороги и улицы Ктаторова (рис. 1).



Рис. 1. Сложная геометрия узла
(ул. Ктаторова – ул. Слободская – съезд с путепровода)

Улучшение условий движения на регулируемых объектах УДС. Низкое значение показателя «насыщенности светофорными объектами (СФО)» в Новополоцке свидетельствует об имеющихся резервах в улучшении условий движения, которые могут быть использованы путем применения светофорного регулирования или оптимизации его показателей. Результаты топографического анализа аварийности подтверждают необходимость совершенствования системы светофорного регулирования в городе.

Введение светофорного регулирования на новых участках УДС. Применение светофорного регулирования необходимо на участках УДС, в настоящее время являющихся нерегулируемыми:

- пешеходные переходы через скоростную дорогу, прилегающие к остановочным пунктам трамвая (в первую очередь в районе Полоцкого государственного университета и автовокзала);
- место перехода трамвайных путей с разделительной полосы скоростной дороги на обособленное полотно (в районе разворотного кольца трамваев), при этом разрешающий сигнал для трамваев должен включаться только при наличии запроса (вызова);
- существующие нерегулируемые пешеходные переходы через улицу Молодежную и др.

Корректировка существующего светофорного регулирования. При любом варианте схемы организации движения на пересечении улиц Калинина и Молодежной (кроме развязки в разных уровнях) обязательным является применение светофорного регулирования на пешеходных переходах через ули-

цу Молодежную, непосредственно прилегающих к перекрестку (с переносом переходов ближе к перекрестку и перепланировкой подходов к ним). При этом целесообразно откорректировать форму направляющих островков, чтобы переходы можно было проложить через них.

На пересечении улиц Калинина и Молодежной необходимо запретить оба левых поворота с улицы Калинина на Молодежную. Движение в указанных направлениях может быть организовано по прилегающей УДС путем объезда кварталов: при движении с моста через реку Западная Двина – по улицам Коласа, Дружбы, Молодежной; при движении со стороны «Полимира» – по скоростной дороге, улицам Юбилейной, Молодежной. На пересечении Молодежная – Заводской проезд необходимо устроить конструктивно выделенные островки безопасности на пешеходных переходах (в настоящее время светофорные колонки установлены непосредственно на проезжей части). На пересечении улиц Ктаторова, Слободская, Блохина необходимо установить пешеходные светофоры на пешеходных переходах перекрестка, на которых в настоящее время движение пешеходов не регулируется (рис. 2, 3).



Рис. 2. Применение отнесенного левого поворота (скоростная дорога – улица Кирова)



Рис. 3. Съезд со скоростной дороги на улице Блохина

Повышение уровня и характеристик автоматической системы управления дорожным движением (АСУДД). Для повышения эффективности управления дорожным движением в Новополоцке целесообразно на базе существующих СФО (АСУДД-100 по классификации Белорусского национального университета) сформировать систему уровня 5 (общегородского) либо включение их в состав региональной АСУДД-604 Витебской области (уровень 6). Центральный диспетчерский пункт (ЦДП) АСУДД-5 может размещаться на территории Новополоцкого участка Витебского СМЭУ.

Базовые периферийные устройства АСУДД (дорожные контроллеры «Думка»), уже установленные на шести СФО Новополоцка, могут использоваться в АСУДД-5 или АСУДД-6. Дорожные контроллеры УК-2 (СФО Молодежная – Ктаторова, Молодежная – площадь Строителей) должны быть заменены в первоочередном порядке, так как они не обеспечивают контроль исправности критических элементов оборудования (красные сигналы светофоров, включение зеленых сигналов в пересекающихся направлениях). Дорожный контроллер модели ДКМ, управляющий СФО Молодежная – Дружбы, по техническим характеристикам может использоваться в АСУДД-5, однако он уже отработал установленный срок службы, поэтому также подлежит замене.

С учетом возможностей современных дорожных контроллеров наиболее перспективным направлением при организации АСУДД-5 или АСУДД-6 в больших городах (в том числе в Новополоцке) является использование беспроводных каналов связи стандарта GSM. При таком варианте создание ЦДП в Новополоцке не обязательно, а СФО могут быть подключены к ЦДП региональной АСУДД-604 в Витебске.

Для повышения пропускной способности улицы Молодежной на ней целесообразна организация координированного светофорного регулирования. До «расшивки» самого «узкого» места (пересечения улиц Калинина и Молодежной) координированное регулирование следует организовывать на двух самостоятельных участках: западнее и восточнее улицы Калинина.

Общей рекомендацией является регулярная корректировка режимов светофорного регулирования всех СФО города при любом уровне АСУДД, а также координированного управления (если оно будет

внедрено) на улице Молодежной. Для сбора актуальных исходных данных необходимо регулярное проведение обследований транспортных и пешеходных потоков, а также условий движения на регулируемых участках УДС города.

Движение маршрутных транспортных средств оказывает существенное влияние на условия движения транспортных потоков. Остановочные пункты (ОП) являются объектами тяготения пешеходных потоков и одновременно оказывают влияние на пропускную способность прилегающей проезжей части и на количество конфликтных ситуаций.

В Новополоцке маршрутные перевозки осуществляются автобусами большой и особо большой вместимости, автобусами малой вместимости (маршрутными такси), а также трамваем. Недостаточная вместимость площадок для отстоя маршрутных транспортных средств (МТС) приводит к их длительной стоянке на проезжей части прилегающих улиц с выключением части полос движения. Поэтому выбор вариантов размещения и промежуточных и конечных остановочных пунктов обязательно должен учитывать возможность полноценной организации движения и размещения технических средств.

Большинство ОП автобусов в Новополоцке расположены на улице Молодежной. Часть из них оборудована заездными «карманами». Однако длина заездных «карманов» недостаточна для размещения всех одновременно прибывающих МТС с учетом автобусов малой вместимости.

Общей рекомендацией является упорядочение использования ОП транспортными средствами, обслуживающими экспресс-маршруты, при совместном использовании ОП крупногабаритными маршрутными транспортными средствами. В соответствии с СТБ 1300-2007 на первой по ходу движения границе посадочной площадки необходимо размещать знак 5.12.1 «Остановочный пункт автобуса», на второй – знак 5.12.2 «Место остановки автобуса» совместно с расписанием движения автобусов. Зона между знаками 5.12.1 и 5.12.2 – зона остановочного пункта для автобусов большой и особо большой вместимости.

На остановочных пунктах места для остановки маршрутных такси целесообразно размещать после остановочного пункта автобуса (в конце остановочной площадки) и обозначать соответствующими дорожными знаками 5.14.1 «Остановочный пункт экспресс-маршрута». На ОП, расположенных на улице Молодежной и не имеющих обозначенных пешеходных переходов в прилегающей к ним зоне, необходимо устройство переходов со светофорным регулированием либо перенос ОП на ближайшие участки со светофорным регулированием.

В пределах территории жилой застройки трамвайная линия с остановочными пунктами расположена на центральной разделительной полосе скоростной дороги. Пешеходные переходы, прилегающие к остановочным пунктам трамвая, нерегулируемые. Поэтому для улучшения условий движения в зоне остановочных пунктов трамвая целесообразно проведение следующих мероприятий:

- пересмотреть размещение остановочных пунктов трамвая встречных направлений и разместить их таким образом, чтобы оба остановочных пункта обслуживались одним пешеходным переходом либо двумя, размещенными на обеих границах зоны остановочных пунктов;

- обозначить все остановочные пункты дорожными знаками 5.13.2 «Место остановки трамвая» на дальней границе остановочного пункта, на первой границе установить дублирующие знаки 5.13.1 «Остановочный пункт трамвая» на разделительной полосе;

- для повышения безопасности движения ввести светофорное регулирование на всех пешеходных переходах через проезжую часть скоростной дороги, обслуживающих остановочные пункты трамвая.

Заключение. В результате выполненного анализа условий движения в Новополоцке с учетом особенностей транспортной планировки города разработаны предложения по улучшению планировочных характеристик улично-дорожной сети города, совершенствованию системы транспортного обслуживания, развитию светофорного регулирования, которые могут быть использованы при разработке комплексной транспортной схемы города и схем организации дорожного движения.

Поступила 08.12.2011

PROPOSALS TO IMPROVE TRAFFIC MANAGEMENT IN NOVOPOLOTSK

V. IVANOV, D. MOZALEVSKII, N. ARTYUSHEVSKAYA

The article lists developed by the research-based suggestions for improving road safety in Novopolotsk. The proposals concern the development of transport network, improve traffic conditions, road surface quality, optimize and introduce traffic light control, etc. The implementation of proposals will enhance the road safety and quality of road traffic.

УДК 656.13.05:656.13.08

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
НА МАГИСТРАЛЬНОЙ УЛИЦЕ ОБЩЕГОРОДСКОГО ЗНАЧЕНИЯ**

*канд. техн. наук, доц. Д.В. КАПСКИЙ, В.Н. КУЗЬМЕНКО,
А.В. КОРЖОВА, Е.Н. ГОРЕЛИК, А.С. ПОЛХОВСКАЯ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Приводятся результаты исследований условий движения, транспортной и пешеходной нагрузки на примере магистральной улицы крупнейшего города. Выполнена оценка эффективности существующей организации движения. Разработаны мероприятия по её совершенствованию, а также мероприятия планировочного и организационно-технического характера для конфликтных и линейных объектов с наибольшим уровнем потерь. Рассмотрена основная задача – сокращение потерь в дорожном движении, решить которую возможно на основании проведенных исследований и разработанных предложений по совершенствованию организации дорожного движения.

Дорожное движение содержит аварийную, экологическую, экономическую и социальную угрозы [1]. Ввиду этого любое проектное решение по организации дорожного движения должно обеспечивать организованное безопасное и комфортное движение автомобилей, пешеходов и велосипедистов [2]. При этом любое решение по организации дорожного движения (будь то планировочное, организационное или управленческое) должно быть оценено с точки зрения его эффективности [3]. Учеными Белорусского национального технического университета предложено оценивать эффективность дорожного движения по величине потерь – экономических, экологических и аварийных [4].

Для апробации соответствующих методик по заказу ГУВД Мингорисполкома выполнены научно-исследовательские работы по совершенствованию организации дорожного движения на улице Клары Цеткин в г. Минске, которая расположена в западном секторе центральной зоны города и относится к категории магистральных улиц общегородского значения (категория А).

В настоящее время в связи с незавершенностью 1-го городского транспортного кольца улица К. Цеткин выполняет функции западного участка этой кольцевой магистрали и соединяет улицы Тимирязева и Бобруйскую, пересекает магистральные улицы юго-западного (ул. Московская, пр-т Дзержинского) и западного (ул. Кальварийская) радиальных направлений и обеспечивает транспортные связи между ними.

Улица К. Цеткин проложена в зоне административно-производственной застройки с элементами складской и парковой зон, что определяет состав движущихся транспортных потоков с высокой долей маршрутных транспортных средств и грузовых автомобилей (в том числе специальной техники). По параметрам поперечного профиля относится к категории А6; ширина проезжей части составляет 24 м; конструктивно выделенная разделительная полоса отсутствует (разобрана в 80-е годы XX века). На подходе к площади Богушевича направляющий островок выделен дорожной разметкой. На перекрестке улиц Цеткин и Либкнехта устроен конструктивно выделенный островок безопасности на пешеходном переходе через первую из них. По особенностям условий дорожного движения и схемы его организации исследованный участок ул. К. Цеткин был разделен на 12 типовых мини-участков (линейных и конфликтных объектов улично-дорожной сети (УДС)):

- объект 1 – регулируемый пешеходный переход через проезжую часть улицы К. Цеткин на приемыкании к кольцевой проезжей части площади Богушевича;
- объект 2 – перегон от регулируемого пешеходного перехода на площади Богушевича до регулируемого Т-образного перекрестка с улицей К. Либкнехта;
- объект 3 – регулируемый Т-образный перекресток с улицей К. Либкнехта;
- объект 4 – перегон от регулируемого перекрестка с улицей К. Либкнехта до регулируемого пешеходного перехода возле дома № 18 (ОАО «ГАЛАНТЭЯ»);
- объект 5 – регулируемый пешеходный переход возле дома № 18;
- объект 6 – перегон от регулируемого пешеходного перехода у дома № 18 до нерегулируемого пешеходного перехода возле дома № 49 (УП «Горремавтодор»);
- объект 7 – нерегулируемый пешеходный переход возле дома № 49;
- объект 8 – перегон от нерегулируемого пешеходного перехода возле дома № 49 до перекрестка с выездом с площадки коммунальной техники (базы УП «Горремавтодор»);
- объект 9 – нерегулируемый Т-образный перекресток с выездом с площадки коммунальной техники;
- объект 10 – перегон от перекрестка с выездом с площадки коммунальной техники до перекрестка с улицей Короля;

- объект 11 – нерегулируемый Т-образный перекресток с улицей Короля и нерегулируемый пешеходный переход;

- объект 12 – перегон от перекрестка с улицей Короля до перекрестка с улицей Кальварийской.

По методике БНТУ [5] выполнены исследования условий движения и характеристик транспортно-пешеходных потоков; по другой методике [6] выполнены исследования и прогнозирование аварийности. Аудит безопасности реализован с учетом [7; 8]. Анализ аварийности выполнен по данным, предоставленным УГАИ ГУВД Мингорисполкома (сведения о ДТП с пострадавшими) и ОГАИ Московского РУВД (ДТП с материальным ущербом).

На рисунке 1 представлены данные об аварийности на исследуемом участке улицы К. Цеткин за 6 лет. Видно, что уровень аварий с материальным ущербом на протяжении трех лет практически устойчивый, а последние два года, особенно в 2007 году, на исследуемом участке улицы данные об авариях с материальным ущербом резко сокращаются (примерно в четыре раза). При этом доля аварий с материальным ущербом составляет около 90 % от общего числа аварий, за исключением 2007 года. Необходимо отметить, что тяжесть последствий на протяжении с 2004 по 2006 год в основном идентична, 6 – 7 пострадавших в год. Распределение аварий по месяцам года приведено на рисунке 2.

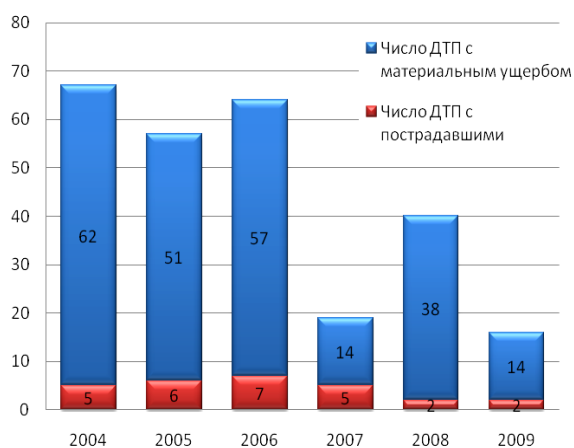


Рис. 1. Распределение аварий по годам

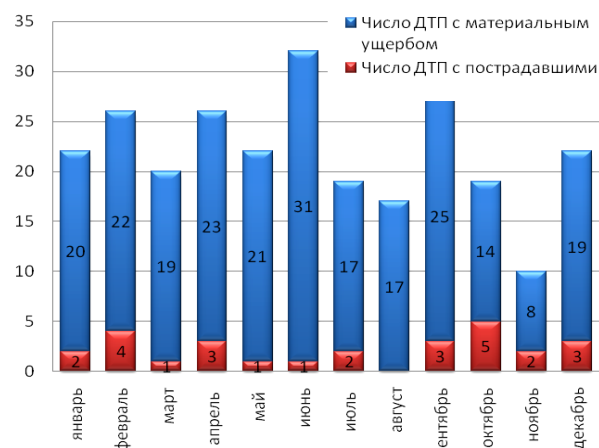


Рис. 2. Распределение аварий по месяцам года

Диаграмма 2 показывает, что наибольшее количество аварий с материальным ущербом регистрируется в июне, а минимальное – в ноябре. Между тем самым «нетяжелым» месяцем можно назвать август – аварий с пострадавшими не происходит. В холодный период года – с сентября по февраль – наблюдается устойчивый уровень аварий с пострадавшими, пик аварийности которых приходится на октябрь. В осенний период наблюдаются наиболее тяжелые аварии. В теплый период года тяжесть аварий несколько снижается. Наиболее аварийный день недели – пятница. Снижение аварийности наблюдается в выходные дни.

Около 70 % аварий составляют столкновения с ударом сзади, которые в основном относятся к категории неотчетных (рис. 3). Примерно 90 % аварий на исследуемом участке регистрируется с материальным ущербом. Однако около 10 % составляют аварии с погибшими и ранеными, в которые входят наезды на пешеходов (8 %), и тяжесть таких аварий уже неоспорима, поскольку в этих происшествиях участвуют малозащищенные участники дорожного движения – пешеходы.

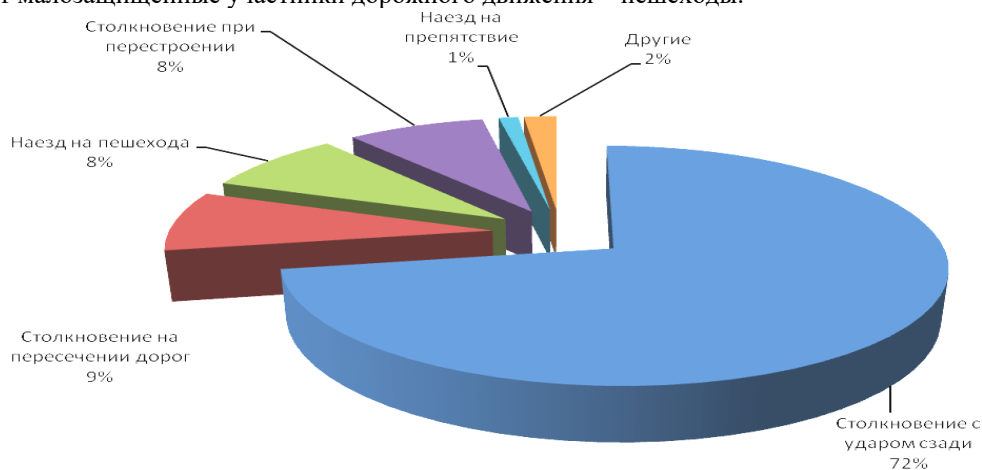


Рис. 3. Распределение аварий по видам ДТП

На рисунке 4 представлен график измерения скорости движения по полосам при движении транспортного потока от площади Богусевича до улицы Кальварийской.

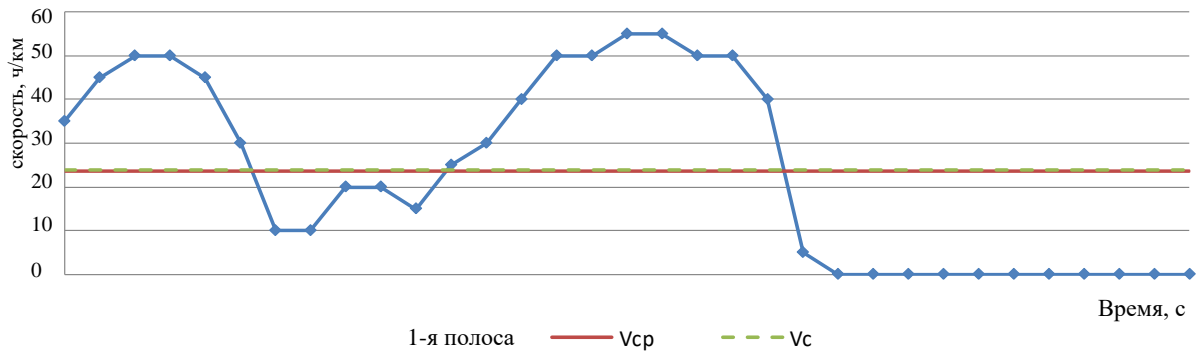


Рис. 4. Графики измерения скорости движения транспортного потока в направлении от площади Богусевича до улицы Кальварийской

Установлено, что значительно выше скорости движения тех автомобилей, которые движутся по третьей полосе. На рисунке 5 показан фрагмент результатов исследований направлений пешеходного движения (выполнены по объектам тяготения). Состав транспортного потока проиллюстрирован диаграммой (рис. 6).

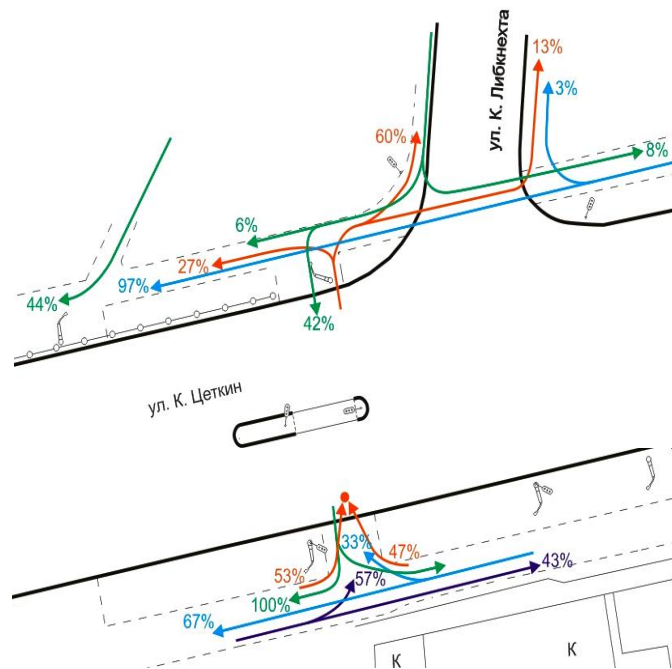


Рис. 5. Распределение пешеходного движения по направлениям (для объекта 3)

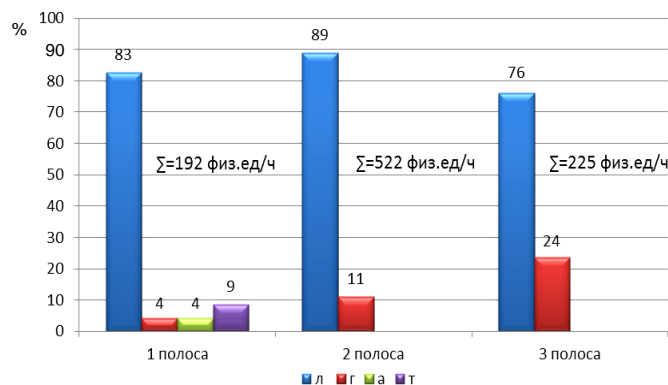


Рис. 6. Диаграмма состава транспортного потока по полосам на входе А

Видно, что по третьей полосе движется также «тяжелый» поток. Это обусловливается тем, что многие грузовые автомобили (в том числе и автопоезда) осуществляют движение налево – левый поворот для заезда на улицу К. Либкнехта для подъезда к объектам промышленного назначения, а также прачечной.

На рисунке 7 в качестве примера приведен фрагмент очагового анализа на перекрестке улиц К. Цеткин и К. Либкнехта.

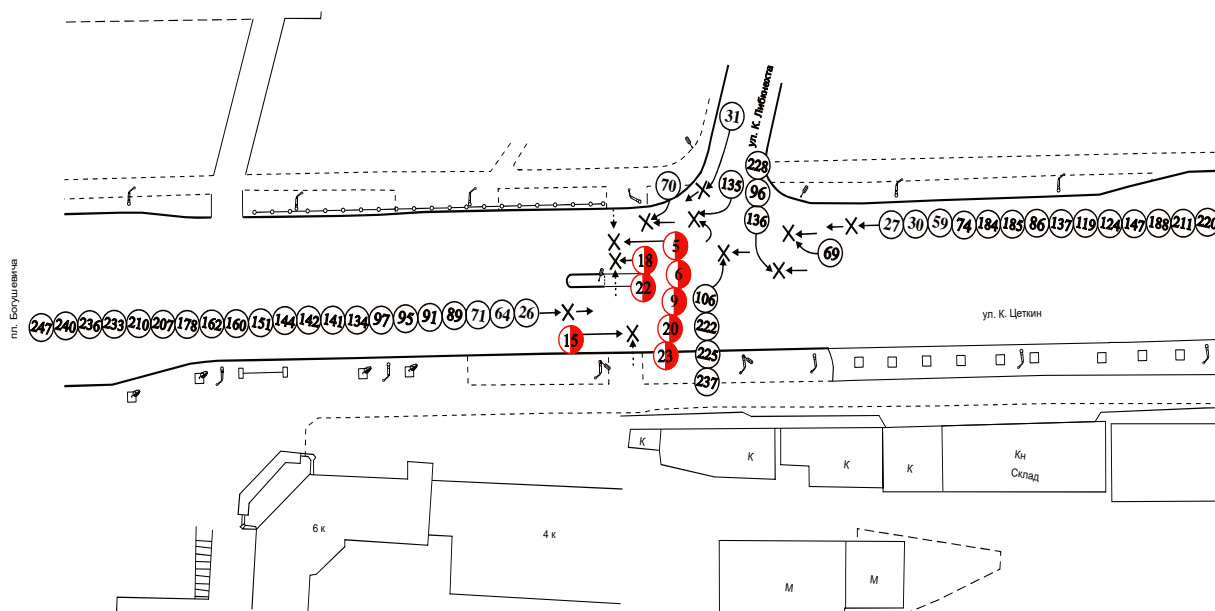


Рис. 7. Очаговый анализ аварийности на объекте (фрагмент)

Видно, что наибольшее число аварий с пострадавшими на данном перекрестке – наезды на пешеходов. Однако после введения светофорного регулирования на этом перекрестке (после 2007 года) таких аварий не наблюдалось. Ряд аварий произошли из-за того, что водителям, осуществляющим выезд с улицы К. Либкнехта, трудно найти приемлемый интервал для того, чтобы «влиться» в транзитный высокоскоростной транспортный поток, движущийся по улице К. Цеткин. И если для водителя сзади идущего автомобиля интервал кажется приемлемым, то для водителя автомобиля-лидера – впереди идущего – не приемлемым, вследствие чего он принимает решение снизить скорость и остановиться. Характерной причиной – отсутствием полосы движения для разгона или торможения – вызвана авария № 70 (см. рис. 7). Часть аварий инициирована отсутствием обособленной левой полосы для движения только левоповоротного транспорта. Другие аварии произошли из-за неправильной оценки интервала в транспортном потоке транзитного встречного направления при осуществлении левого поворота. Это обстоятельство обуславливает отсутствие в светофорном цикле отдельного времени для движения левоповоротного транспорта. Регулирование организовано методом «просачивания». Проведенное исследование условий движения и параметров транспортно-пешеходных потоков позволило выявить недостатки с учетом изложенного в [8]. По совершенствованию организации дорожного движения с учетом [9; 10] предложены соответствующие мероприятия.

По результатам экспериментальных исследований был проведен расчет потерь в дорожном движении при существующей организации движения (таблица), а также определены относительные показатели аварийности на исследуемых объектах (рис. 8).

Расчет потерь на объекте при существующих условиях

Наименование параметра		Индекс	Размерность	Значение
Среднегодовое число	погибших	n_{ac}	чел./год	–
	раненных	n_{ap}	чел./год	1,4
	аварий с материальным ущербом	n_{am}	ав./год	8,5
Удельная аварийность		n_a	ав./млн. авт.	0,88
Аварийные потери		Pa	тыс. долл./год	9,9
Экологические потери		$P_{экл}$	тыс. долл./год	46,5

Экономические потери	$P_{эки}$	тыс. долл./год	145,4
Суммарные потери	P_{Σ}	тыс. долл./год	201,8

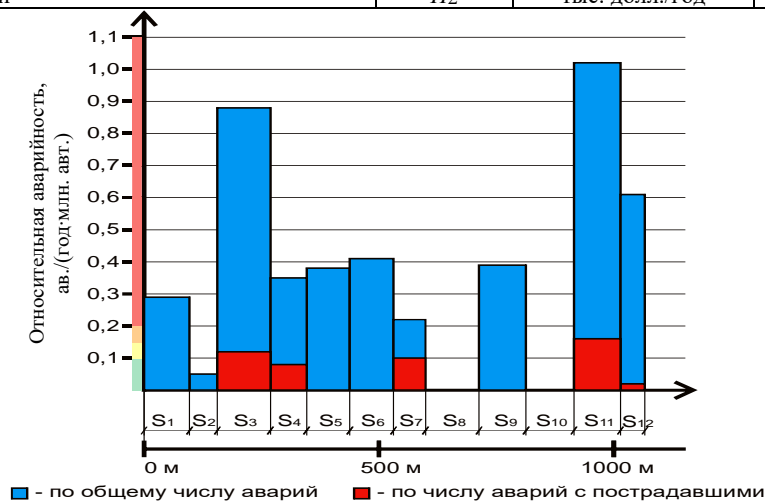


Рис. 8. Относительные показатели аварийности на объектах УДС ул. К. Цеткин

Из рисунка 8 видно, что наиболее опасные участки – конфликтные объекты (регулируемый Т-образный перекресток с регулируемым пешеходным переходом; объект № 7; нерегулируемый пешеходный переход с выездом; нерегулируемый Т-образный перекресток с нерегулируемым пешеходным переходом – объект № 11 и т.д.). Наиболее аварийно опасным является объект № 11. В связи с этим указанным объектам уделено особое внимание при разработке мероприятий по улучшению условий движения. В зависимости от полученных экспериментальных данных были рассчитаны экономические показатели качества дорожного движения – потери в дорожном движении на исследуемых объектах (аварийные, экономические и экологические) при существующих условиях. Участками, на которых наблюдается повышенный уровень потерь, являются конфликтные объекты – пешеходные переходы (регулируемые и нерегулируемые) и регулируемый Т-образный перекресток. Это связано с тем, что именно на таких объектах происходит повышенное количество остановок и троганий; конфликтное взаимодействие транспортных потоков между собой и транспортно-пешеходных потоков; наблюдается высокий уровень задержек транспорта из-за наличия светофорного регулирования или необходимости пропуска пешеходов при нерегулируемом режиме и т.д. Следовательно, растут и экономические, экологические и аварийные потери.

На основании проведенных исследований с целью сокращения потерь в дорожном движении разработаны предложения по совершенствованию организации дорожного движения, которые позволяют решить следующие основные задачи:

- 1) устранение нерегулируемых конфликтов «транспорт – пешеход», отличающихся повышенной аварийностью и недопустимых на улице категории А6;
- 2) устранение нерегулируемых левых поворотов с улицы К. Цеткин, освобождение левой (самой быстрой) полосы от остановившихся транспортных средств, ожидающих возможности выполнить левый поворот (или разворот);
- 3) ликвидация выездов на улицу К. Цеткин с левыми поворотами в нерегулируемом режиме;
- 4) минимизация помех, создаваемых маршрутными транспортными средствами основному потоку;
- 5) улучшение информативности дорожных светофоров за счет размещения дублирующих светофоров в зоне наилучшей видимости и применения современных технических решений;
- 6) улучшение условий движения пешеходов на регулируемых участках путем применения современных технических средств и корректировки режимов работы пешеходных светофоров;
- 7) размещение регулируемых участков в местах, обеспечивающих возможность организации координированного регулирования на исследуемом участке улицы К. Цеткин;
- 8) определение разрешенных направлений движения из каждой полосы в местах въездов на площадь Богушевича (на границе исследуемого участка);
- 9) создание «безбарьерной» среды на пешеходных переходах;
- 10) организация парковочных мест вне основной проезжей части улицы К. Цеткин.

Заключение. В результате проведенных исследований и анализа существующих условий дорожного движения на участке улицы Клары Цеткин от площади Богушевича до улицы Кальварийской

установлено, что уровень суммарных потерь в дорожном движении на исследуемом участке составляет около 920 000 долл./год, в том числе потери от аварийности – 85 700 дол./год.

Выполнено структурирование улицы К. Цеткин на 12 объектов конфликтного и линейного типа. Установлено, что наибольший уровень потерь обеспечивают объекты конфликтного типа № 3, 4, 7, 11.

Разработаны мероприятия планировочного и организационно-технического характера для конфликтных и линейных объектов с наибольшим уровнем потерь, предложены варианты возможных изменений. Реализация разработанных мероприятий позволит снизить уровень потерь в дорожном движении на исследованном участке улицы К. Цеткин ориентировочно на 400...450 тыс. дол./год (в зависимости от варианта, выбранного для реализации), в том числе с уменьшением числа аварий не менее, чем на 37 %.

Необходимо отметить, что общим из предложений по всей магистрали является введение координированного регулирования на данном участке улицы К. Цеткин. Введение эффективного координированного движения возможно после внедрения разработанных предложений, поскольку все помехи транзитному движению максимально ликвидированы (организовано движение левоповоротных потоков с отдельной полосы движения; ликвидированы нерегулируемые конфликтные объекты). Расположение регулируемых объектов способствует координированному движению (расстояние между ними 300...500 м).

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 14 июня 2006 г., № 757 // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2006. – № 5/22459.
2. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования = Вуліцы населеных пунктаў. Будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-3.03-227-2010 (02250). – Введ. 17.12.10. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь. – 46 с.
3. Аксенов, В.А. Экономическая эффективность рациональной организации дорожного движения / В.А. Аксенов, Е.Л. Попова, О.А. Дивочкин. – М.: Транспорт, 1987. – 128 с.
4. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении: моногр. / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
5. Врубель, Ю.А. Организация дорожного движения: в 2 ч. / Ю.А. Врубель. – Минск: Белорус. фонд безопасности дорожного движения, 1996. – Ч. 2. – 306 с.
6. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении: моногр. / Д.В. Капский. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
7. Капский, Д.В. Очаговый анализ аварийности – основа аудита безопасности дорожного движения / Д.В. Капский // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сб. докл. девятой междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 23 – 24 сент. 2010 г. / СПбГАСУ. – СПб., 2010. – С. 498 – 503.
8. Капский, Д.В. Применение аудита безопасности дорожного движения на магистральных улицах городов / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.В. Кабак // Автомобильные дороги и мосты. – 2010. – № 2(6). – С. 127 – 137.
9. Чикалина, С.Л. Методика выделения зон успокоения движения и мест размещения пешеходных зон в центральной части г. Иркутска / С.Л. Чикалина // Вестн. ИрГТУ. – 2007. – № 2(30). – С. 11 – 13.
10. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферный воздух. Правила расчета выбросов механическими транспортными средствами в населенных пунктах = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Атмасфера. Выкіды забруджвальных рэчываў і цяплічных газаў у атмасфернае паветра. Правілы разліку выкідаў механічнымі транспартнымі сродкамі ў населеных пунктах: ТКП 17.08-03-2006 (02120). – Введ. 28.06.06. – Минск: РУП «Бел НИЦ «Экологія». – 18 с.

Поступила 20.01.2012

IMPROVEMENT OF ROAD TRAFFIC ON MAIN STREET OF CITY

D. KAPSKY, V. KUZMENKO, A. KORZHOVA, E. GORELICK, A. POLKHOVSKY

The results of the investigation of operating conditions and transport and pedestrian load on the example of the main street of the largest city are shown. The effectiveness of the existing traffic organization is estimated and measures for perfection of the traffic organization as well as measures of planning, organizational and technical character for conflict and linear objects with the highest degree of losses are worked out. Primary tasks are considered: loss reduction in traffic, to solve which is possible in virtue of carried out investigation and worked out proposals for the traffic management perfection.

УДК 621.791.01; 621.791.03

**ДУГОВАЯ СВАРКА И ПАЙКА ОЦИНКОВАННЫХ УЗЛОВ ТЕПЛОТРАСС
И ИХ КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ****А.В. ЛУПАЧЁВ***(Белорусско-Российский университет, Могилёв);**д-р техн. наук, проф. С.К. ПАВЛЮК**(ООО «СМИТ-Ярцево», Смоленская обл., г. Ярцево)*

Определены характерные участки повреждения цинкового покрытия на стали при дуговой сварке и пайке. Выявлены зависимости ширины участков повреждения от параметров режимов процесса. Установлена максимальная ширина повреждения цинкового покрытия, обеспечивающая действие анодной защиты. Исследованы и оценены коррозионные и прочностные свойства сварных и паяных соединений оцинкованных сталей в коррозионной среде, выполненных высокопроизводительными способами дуговой сварки и пайки с использованием новых электродных материалов на основе железа, меди, алюминия, цинка и современного оборудования применительно к строительству теплотрасс. Разработаны пути минимизации повреждения покрытия без потерь производительности и приближения коррозионной стойкости соединения к стойкости основного металла регулированием тепловложения и состава шва.

Введение. Теплоснабжение промышленных объектов, гражданских и жилых зданий, строительство, реконструкцию и капитальный ремонт тепловых сетей и систем теплоснабжения в Республике Беларусь осуществляют преимущественно в бесканальном исполнении [1; 2]. Развитием современных способов энергосбережения, модернизацией и строительством теплотрасс с применением высокоэффективной теплоизоляции достигнуто существенное снижение теплоэнергетических потерь [3; 4]. При подземной прокладке используют теплогидроизолированные трубы с пенополиуретановой изоляцией в полиэтиленовой оболочке, а при наземной прокладке – трубы в спирально-навивной оболочке из тонколистовой оцинкованной стали [5].



Рис. 1. Концевые элементы трубопроводов из стальных труб в полиэтиленовой и оцинкованной спирально-навивной оболочке

Для защиты теплотрасс от вредного воздействия окружающей среды и продления срока эксплуатации трубопроводов при изготовлении герметичных узлов концевых и фасонных элементов из оцинкованных сталей и их монтаже используют сварку. Концевые элементы трубопроводов (рис. 1) изготавливают из оцинкованной стали с применением дуговой сварки и пайки. Трубопроводы систем теплоснабжения в процессе эксплуатации подвержены воздействию коррозионно-активных сред, высокой влажности воздуха (80...95 %) и повышенным температурам (130...150 °С). Нормативный срок эксплуатации изделия – 30 лет. При таком сроке эксплуатации обеспечение коррозионной стойкости сварных соединений является важной задачей, следовательно, необходим комплекс исследований по повышению коррозионной стойкости соединений из оцинкованных сталей и разработке соответствующих технологических процессов.

Методика исследований, материалы и оборудование. При выполнении исследований в качестве основного металла использованы трубы из низкоуглеродистой стали марки 10 диаметром 33,5...165 мм с толщиной стенки 4,25...7,5 мм по ГОСТ 3262-75 или ГОСТ 10705-80 с оцинкованием по ТУ14-162-55-99, и оцинкованная тонколистовая сталь 08Ю по ГОСТ 14918-69 толщиной 1,5 мм. Двустороннее цинковое покрытие толщиной 18...40 мкм нанесено горячим способом; масса 1 м² слоя покрытия составляет 258...570 г; качество поверхности соответствует ГОСТ 16523-97.

Ручную дуговую сварку выполняли покрытыми электродами УОНИИ 13/45 и МР-3 диаметром 3 мм. При механизированной дуговой сварке на установках Magster 351 и Powertec 300S фирмы Lincoln Electric (США) использовали стальные проволоки марок Св-08Г2С и Св-06Х19Н9Т. Дуговую пайку проволокой из медных сплавов марок CuSi3 и CuAl8 диаметром 1 мм осуществляли на установках Trans Puls Synergic 2700 фирмы «Fronius» (Австрия), Aristo Mig C300 фирмы Esab (Швеция) и Divari-Arc 320 фирмы Hermann Welding (Германия); дуговую пайку электродной проволокой из алюминиевого сплава марки AlSi5 – на установке Trans Puls Synergic 2700; дуговую пайку проволокой на основе цинка марки ZnAl4 диаметром 0,8 и 1 мм – на установке Phoenix 330 фирмы EWM (Германия). Такое разнообразие использованного оборудования вызвано необходимостью сравнительного исследования возможностей управления процессами сварки и пайки с использованием различных методов.

Ручную дуговую сварку выполняли на открытом воздухе, сварку стальными проволоками – в CO₂ и смеси Ag + CO₂, дуговую пайку проволоками из цветных металлов – в аргоне.

Режимы сварки и пайки варьировались в пределах: сила сварочного тока $I_{св} = 25 \dots 120$ А; напряжение на дуге $U_d = 13 \dots 18$ В; скорость сварки $V_{св} = 20 \dots 80$ м/ч; скорость подачи электродной проволоки $V_{пл} = 2 \dots 5,2$ м/мин; расход защитного газа $4 \dots 8$ л/мин. Погонная энергия составляла: $q/V\delta = 9,6 \cdot 10^7$ Дж/м² – при дуговой сварке проволоками из сплава на основе железа с $T_{пл} \approx 1500$ °С; $q/V\delta = 5,76 \cdot 10^7$ Дж/м² – при дуговой сварке проволокой из медных сплавов с $T_{пл} \approx 1000$ °С; $q/V\delta = 2,55 \cdot 10^7$ Дж/м² – при дуговой пайке проволокой из алюминиевого сплава с $T_{пл} \approx 600$ °С и проволокой на цинковой основе с $T_{пл} \approx 450$ °С.

Структуру соединений исследовали на макрошлифах при увеличении $\times 10$ и $\times 20$, а микроструктуру и характер повреждения покрытия изучали на металлографическом микроскопе Neophot 21 с цифровой регистрацией структур.

Коррозионные испытания образцов проводили в 0,75 %-ном растворе HCl + NaCl на дистиллированной воде в соответствии с ГОСТ Р 9.905.2007. В качестве информативных параметров процесса выбраны интенсивность образования пузырьков водорода, характер изменения отражения света от цинкового покрытия и время его растворения до основного металла.

Результаты исследований. При дуговой сварке стальным электродом расплавляются основной и электродные металлы. Шов образуется вследствие роста кристаллов шва с поверхности частично оплавленных зерен основного металла. При соединении оцинкованных сталей электродными проволоками на основе цветных металлов возможны два механизма образования соединения: с расплавлением основного металла и последующей кристаллизацией шва, содержащего определенную долю расплавленного основного металла, либо образование шва вследствие смачивания свариваемой стали расплавленным металлом. Последний процесс, по сути, является пайкой. В обоих случаях на границе «основной металл – металл шва» в процессе кристаллизации жидкого металла или диффузионных процессов формируется прослойка сложной структуры и состава.

На образцах, выполненных проволоками Св-08Г2С и Св-06Х19Н9Т, под воздействием термического цикла сварки вдоль шва образуется полоса повреждения цинкового покрытия шириной 8...12 мм. В образцах, выполненных проволоками CuSi3 и CuAl8, полоса повреждения цинкового покрытия вдоль шва составляла 0,5...1,4 мм. Образцы, паяные проволоками AlSi5 и ZnAl4, видимых следов повреждения цинкового покрытия не имели.

При использовании электродных проволок на основе алюминия возможно образование участков со случайным расплавлением основного металла, что приводит к образованию в шве хрупких интерметаллидных соединений (преимущественно Fe₃Al).

В результате исследований структуры, состава и свойств паяных соединений установлено, что для обеспечения максимальных показателей прочности дуговую пайку проволоками из алюминиевых сплавов необходимо вести таким образом, чтобы дуга нагревала цинковое покрытие и не расплавляла сталь. В этом случае ограничивается переход железа в шов и обеспечивается пластичность шва. При соединении проволок из медных сплавов возможно расплавление стали, которое желательно ограничивать для уменьшения перехода железа в металл шва и негативного влияния на пластичность металла шва.

При пайке оцинкованных сталей сплавами на основе цинка для нагрева и плавления припоя часто применяют газовые горелки либо печи. Такие технологические процессы трудоемки и не всегда применимы для изготовления деталей и узлов трубопроводов. Более эффективны современные технологии, основанные на использовании дуговых процессов, обеспечивающие устойчивое горение дуги на малой силе сварочного тока и регулируемых периодических коротких замыканиях дугового промежутка. Это позволяет реализовать дуговую пайку оцинкованных сталей с использованием проволочного электрода из цинкового сплава. Эти процессы являются высокопроизводительными и отличаются локальным нагревом металла в процессе сварки.

Нагрев и плавление основного металла приводят к повреждению и разрушению цинкового покрытия вблизи шва, а стальной шов при этом не защищен от коррозии. Возможно повреждение цинкового покрытия с внутренней стороны трубы. В процессе эксплуатации теплотрасс производят местный ремонт или замену стальной изоляционной оболочки с поврежденным покрытием. Разрушение покрытия характеризуется шириной поврежденных участков и оставшейся после высокотемпературного нагрева толщиной слоя цинка. Ранее выполненными исследованиями [6] определены основные факторы, влияющие на степень повреждения цинковых покрытий.

Главный фактор повреждения покрытия – тепловложение в свариваемый металл, основной характеристикой которого выступает погонная энергия сварки. Важным фактором является состав металла шва, определяющий температуру его плавления, который зависит от марки используемой электродной проволоки. Эти факторы определяют термический цикл сварки, влияющий на характер процесса повреждения, ширину поврежденного участка и остаточную толщину цинкового покрытия. Степень повреждения покрытия зависит от времени пребывания металла покрытия при температурах кипения, плавления и окисления цинка. На степень повреждения покрытия влияет состав защитной атмосферы и скорость ее перемещения относительно поверхности свариваемого металла: $V_{з.с.} \rightarrow 0$ при сварке в защитных камерах и $V_{з.с.} \leq 6$ л/мин = $V_{сопла}$ при сварке.

Сварку стыковых и угловых соединений оцинкованных сталей выполняют за один проход. Для этого случая Н.Н. Рыкалиным [7] разработана математическая модель нагрева пластины, в соответствии с которой выполнен анализ процессов разрушения покрытия.

Общая ширина зоны повреждения цинкового покрытия при дуговой сварке стальной проволокой в защитном газе достигает 24 мм, а при дуговой пайке проволоками из меди – 1...3 мм по двум сторонам шва. В этой зоне можно выделить три характерных участка, отличающихся по механизму повреждения (рис. 2).

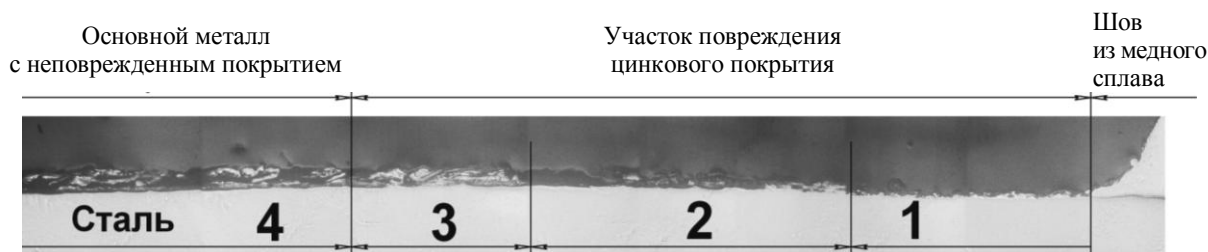


Рис. 2. Зона повреждения цинкового покрытия при дуговой сварке электродной проволокой из медного сплава CuSi3:

1 – участок кипения цинка; 2 – участок расплавления; 3 – участок окисления; 4 – неповрежденное цинковое покрытие

На участке, прилегающем к сварному шву и нагретом до температур выше температуры кипения цинка (911 °С), происходит интенсивное разрушение покрытия вследствие кипения и испарения цинка.

На участке плавления металл нагрет до температур 911...419 °С, превышающих температуру плавления цинка, и здесь возможен процесс окисления цинка при сварке открытой дугой. Интенсивность испарения цинка постепенно снижается по мере удаления от оси шва в сторону точек, нагретых до температуры плавления. Упругость диссоциации оксида цинка по сравнению с железом более низкая, что свидетельствует о более высоком сродстве цинка к кислороду. В связи с этим воздух и углекислый газ для цинка являются окислительной средой, способствующей повреждению покрытия от окисления цинка, а увеличенные скорости истечения защитного газа приводит к повреждению покрытия от испарения цинка. Пары цинка окисляются при взаимодействии с кислородом воздуха, образуя дисперсные оксиды, являющиеся вредными веществами, которые переносятся нагретым воздухом и загрязняют зону дыхания сварщика.

На участке окисления, нагретом до температур 419...200 °С, при сварке покрытыми электродами или в углекислом газе образуются слои оксида цинка невысокой плотности. Кислород из окислительной среды проникает к поверхности цинкового покрытия, которое окисляется частично, а при качественной защите зоны сварки инертным газом сохраняется. При естественном испарении цинка, когда отсутствует принудительное движение его паров, процесс испарения идет медленно, однако существенно ускоряется при обтекании расплавленного покрытия и сдувании паров цинка потоком защитного газа, т.е. при механизированной дуговой сварке может происходить увеличение скорости испарения цинка. Определение толщины слоя испаряющейся части покрытия при обдувании потоком защитного газа выполнено с использованием преобразованного уравнения Клапейрона – Менделеева [8]. Исследования показали, что изменение скорости истечения защитного газа и снижение парциального давления над расплавленным металлом вследствие сдувания защитным газом интенсифицирует процесс разрушения покрытия вследствие более быстрого его испарения. Давление паров над испаряющимся цинком зависит от промежуточного слоя покрытия, через который атомы цинка при испарении диффундируют в окружающую среду.

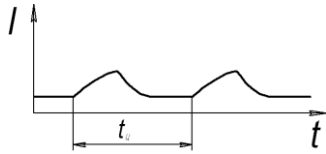
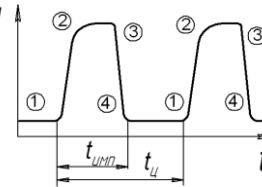
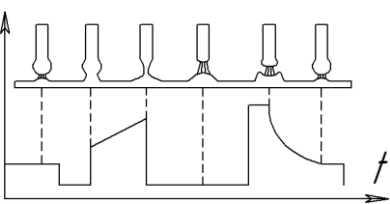
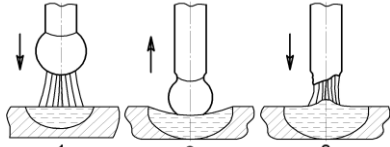
Содержание кислорода для предотвращения окисления цинка должно быть меньше величины упругости оксида цинка. Возникающий подсос воздуха в газовую струю, истекающую из сопла горелки (обычно до 5 % по объему), затрудняет выполнение этого условия при струйной защите и вполне возможно при сварке в заполненных аргоном высокой чистоты камерах. Поэтому в качестве защитной среды необходимо использовать аргон или его смеси, например, с водородом.

Снижение тепловложения в свариваемое изделие (удельной погонной энергии) ограничивается двумя факторами: снижением устойчивости горения дуги из-за коротких замыканий дугового промежутка каплями преходящего в шов металла; недопустимым снижением производительности процесса сварки при существенном ограничении силы сварочного тока. Преодолеть негативные воздействия этих факторов позволяют возможности нового сварочного оборудования [9]. Современные инверторные источники питания с цифровым управлением работают на частоте 20...100 Гц, обеспечивают устойчивое горение дуги на малых токах, легкое ее возбуждение после обрывов, что делает их пригодными для выполнения сварочных работ на металлах с защитными покрытиями [10]. Повышению производительности процесса дуговой сварки способствует принудительный отрыв капли с торца сварочной проволоки импульсом тока или замедлением скорости ее подачи вплоть до реверса. В таблице 1 приведены характеристики сва-

рочных процессов и современного оборудования с цифровым управлением механизмов подачи электродной проволоки, позволяющие осуществлять ее остановку или реверс.

Таблица 1

Характеристики сварочных процессов и современного оборудования

Метод управления	Осциллограммы процесса и кинограммы перехода капли	Рациональная область использования	Рекомендуемое оборудование
С саморегулированием длины дуги	 <p>при среднекапельном переносе без коротких замыканий дугового промежутка</p>	Сварка изделий различного назначения	Magster 351; Powertec 300S, Lincoln Electric (США)
Импульсами тока заданной частоты без обратных связей	 <p>1 – предварительный нагрев проволоки; 2 – расплавление проволоки; 3 – отделение капель; 4 – переход капли в сварочную ванну</p>	Сварка тонколистовой стали; включая сталь с защитными покрытиями	Trans Puls Synergic 2700, Fronius (Австрия)
Цифровым регулированием импульсами тока с обратными связями		Сварка тонколистовой стали и стали с защитными покрытиями	Invertec Power Wave C300 Lincoln Electric (США)
Инерционными силами с обратными связями	 <p>1 – рост капли при нагреве током и дугой; 2 – момент приложения реверсивного ускорения; 3 – возобновление горения дуги и плавления электрода</p>	Сварка тонколистовой, оцинкованной стали, алюминиевых сплавов	Trans Puls Synergic 2700, Fronius (Австрия)

Исследования показывают, что при некотором сохранении покрытия в соединениях, выполненных дуговой сваркой, металл шва не защищен от коррозии. Участки покрытия с частично или полностью разрушенным цинковым слоем обладают пониженной коррозионной стойкостью, которая существенно зависит от ширины участка повреждения покрытия в результате высокотемпературного нагрева.

Анализ результатов исследований коррозионной стойкости оцинкованных сталей с предварительным повреждением покрытия в виде полос и определение гальванических токов, свидетельствует о том, что существует критическая ширина повреждения, при которой реализуется действие анодной защиты. Установлено, что действие анодной защиты обеспечивается, если ширина зоны повреждения покрытия не превышает 0,9...1,4 мм, и если сам шов при этом будет обладать достаточной коррозионной стойкостью, соединение не образует гальванических пар с основным металлом и покрытием.

В результате коррозионных испытаний, определения топографии и распределения электродных потенциалов на сварных и паяных соединениях оцинкованных сталей, находящихся в агрессивной влажной среде, сформулирован новый подход к обеспечению коррозионной стойкости. Суть его состоит в том, что коррозионная стойкость сварных соединений обеспечивается, если ширина зоны с разрушенным цинковым покрытием от воздействия термического цикла сварки не превышает зону анодной защиты стали цинковым покрытием $l_{кр}$ (рис. 3). В ходе исследований этот подход подтвержден экспериментально. Установлено, что близкая к коррозионной стойкости основного металла, стойкость сварного соединения обеспечивается, если ширина зоны повреждения цинкового покрытия сваркой, меньше ширины зоны

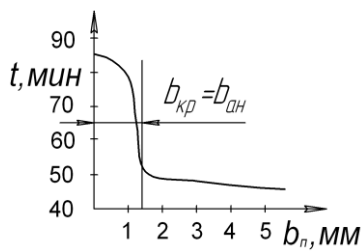


Рис. 3. Определение максимальной ширины повреждения цинкового покрытия, сохраняющей антикоррозионную защиту

анодной защиты и металла шва стоек к коррозии, а разность потенциалов между металлом шва и покрытия не превышает 0,33 В. Этим условиям не удовлетворяют швы, выполненные проволоками из низколегированной стали типа Св-08Г2С, поскольку общая ширина шва и поврежденных участков существенно больше ширины зоны протекторной защиты.

Поврежденная зона цинкового покрытия при сварке электродными материалами на основе железа состоит из нескольких участков: участков с поврежденным покрытием, расположенным вблизи шва; сварного шва; околошовной зоны, нагретой выше температуры окисления цинка, но без видимых повреждений покрытия. При использовании сварочных материалов на основе цветных металлов (Cu, Al, Zn) условием обеспечения коррозионной стойкости соединений во влажных агрессивных средах, характерных для условий эксплуатации оцинкованных элементов теплотрасс, будет: $l_{повр} \leq l_3$, где l_3 – ширина действия анодной защиты.

Во всех случаях сварки $l_{повр}$ определяется величиной тепловложения в изделие – погонной энергией при сварке. Протяженность участков повреждения цинкового покрытия практически линейно зависит от погонной энергии (рис. 4).

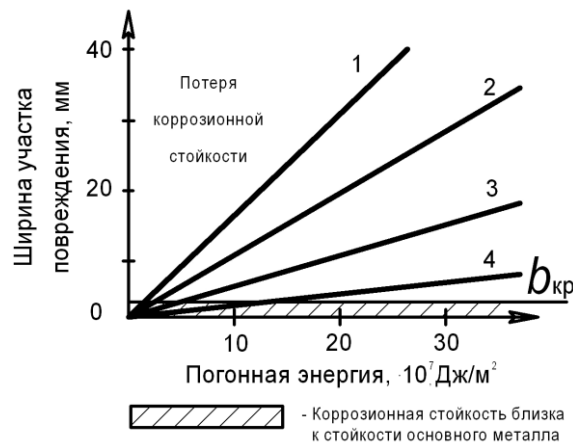


Рис. 4. Влияние погонной энергии на ширину участков повреждения покрытия при толщине металла 2 мм:
 1 – участок окисления покрытия при сварке и пайке; 2 – участок плавления цинка при сварке и пайке;
 3 – участок кипения цинка при сварке; 4 – участок кипения цинка при пайке

Экспериментально установлено, что наименьшей коррозионной стойкостью обладают соединения оцинкованных сталей, выполненные сварочными проволоками на основе железа (Св-08Г2С и Св-06Х19Н9Т), так как повреждение цинкового покрытия шире критической зоны действия анодной защиты. Далее по снижению коррозионной стойкости следуют соединения, выполненные электродной проволокой

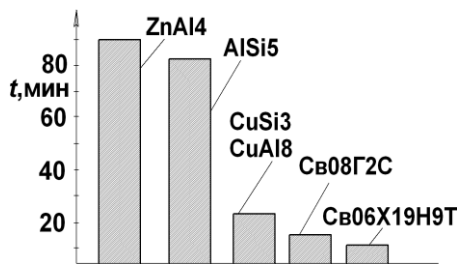


Рис. 5. Время растворения цинкового покрытия до основного металла в соединениях, выполненных проволоками разного химического состава

на основе меди (CuSi3, CuAl8), поскольку возникает гальваническая пара, и по поверхности соединения протекают гальванические токи. Наиболее стойкими оказались паяные соединения, выполненные проволоками на основе алюминия (AlSi5) и цинка (ZnAl4) (рис. 5). Это объясняется более низкой, чем у железа (1539 °С), температурой плавления рассматриваемых цветных металлов (меди – 1083 °С; алюминия – 660 °С; цинка – 419 °С) и, как следствие, более низкой погонной энергией, необходимой для образования шва, меньшим тепловложением в изделие, что снижает перегрев и степень повреждения защитного цинкового покрытия. Меньшая, чем при сварке проволоками из сплавов на основе железа, ширина повреждения цинкового покрытия (0,5...1 мм) при пайке проволоками на основе меди компенсирует большую разность потенциалов, увеличивая коррозионную стойкость соединения.

Отсутствие повреждения покрытия, небольшая разность электродных потенциалов (0,9 В) и образование оксидной пленки на шве, выполненном электродной проволокой на основе алюминия (AlSi5), способствует сохранению антикоррозионных свойств на уровне основного металла. В таблице 2 приве-

дена сравнительная характеристика коррозионных свойств соединений из оцинкованных сталей, выполненных дуговой сваркой и пайкой.

Таблица 2

Сравнительная характеристика коррозионных свойств оцинкованных соединений деталей и узлов теплотрасс

Способ соединения	Характеристика повреждения покрытия	Коррозионные свойства соединений	Рекомендации по применению
Ручная дуговая сварка	Значительные повреждения покрытия, незащищенный шов	На уровне стали без защитного покрытия	Сварка с последующей обработкой цинкосодержащими красками
Механизированная дуговая сварка стальной проволокой	Ширина участка повреждения покрытия с 2-х сторон шва 18...22 мм	10...15 % от стойкости основного металла: ширина участка без покрытия превышает зону действия анодной защиты	Сварка ответственных изделий с покрытиями
Дуговая пайка проволокой из медных сплавов	Ширина участка повреждения покрытия с 2-х сторон шва 4...6 мм: (сохраняется 25...40 % толщины покрытия)	25...30 % от стойкости основного металла: ширина повреждения превышает зону действия анодной защиты	Соединение слабонагруженных узлов
Дуговая пайка проволокой из алюминиевых сплавов	Ширина участка повреждения покрытия с 2-х сторон шва 2...4 мм: (сохраняется 35...50 % толщины покрытия)	85...90 % от стойкости основного металла: невысокая разность электродных потенциалов металла шва и металла покрытия	Герметизация ненагруженных соединений
Пайка проволокой из цинковых сплавов	Ширина участка повреждения покрытия с 2-х сторон шва 1,5...3 мм	90...95 % от стойкости основного металла: на зону повреждения распространяется анодная защита	Герметизация соединений
Пайка оловянно-свинцовистыми припоями	Незначительные повреждения покрытия	90...95 % от стойкости основного металла: невысокая разность электродных потенциалов металла шва и металла покрытия	Пропайка фальцевых соединений, работающих при $T < 0,7T_{пл}$ припоя

Прочность соединений из оцинкованных сталей существенно зависит от типа используемого электродного материала. При использовании ручной дуговой сварки покрытыми электродами и механизированной дуговой сваркой в защитных газах шов равнопрочный с основным металлом, а при использовании проволоки на основе цветных металлов – существенно ниже. Механические свойства соединений оцинкованных сталей обеспечиваются на уровне свойств применяемого цинкового сплава, но могут быть и выше при использовании эффекта контактного упрочнения при малых зазорах в соединении. В таблице 3 представлены способы соединения оцинкованных узлов теплотрасс и прочность соединений.

Таблица 3

Способы соединения оцинкованных узлов теплотрасс и прочность соединений

Способ соединения	Электродный материал	Защитная атмосфера	Прочностные свойства стыковых соединений, σ_B
Ручная дуговая сварка	Покрытый электрод на основе железа: марок Св-08; Св-08А	CO ₂	Равнопрочное с основным металлом
Механизированная дуговая сварка	Проволока на основе железа: марок Св-08Г2С, Св-06Х19НТ	CO ₂ Ar + CO ₂	Равнопрочное с основным металлом
Дуговая пайка	Проволока из медного сплава: марок CuSi3; CuAl8	Ar	(0,8...0,9) σ_B
Дуговая пайка	Проволока из алюминиевого сплава: марки AlSi5	Ar	(0,4...0,45) σ_B
Дуговая пайка	Припой на основе цинка: марки ZnAl4	Ar	(0,3...0,35) σ_B
Пайка	Припой оловянно-свинцовистый: марки ПОС 40	Воздух	(0,1...0,2) σ_B

Прочностные свойства шва при дуговой пайке проволоками из медных сплавов приближаются к свойствам основного металла, поскольку возможный небольшой переход цинка в шов практически не влияет на свойства металла. Соединения, выполненные материалами из алюминиевых сплавов, отличаются высокой хрупкостью. При остывании швов, содержащих железо, возможно образование трещин, причем интенсивность процесса трещинообразования возрастает с увеличением содержания железа в алюминиевом металле шва. Для получения качественного соединения необходимо использовать минимальную погонную энергию при дуговой сварке и пайке. Однако при этом снижается устойчивость горения дуги на малой силе сварочного тока и возникают трудности при ручном манипулировании и перемещении сварочной горелки на высоких скоростях сварки, что преодолевается автоматизацией и роботизацией процесса.

Заключение. Для минимизации воздействия сварочного нагрева на ширину и глубину повреждения цинкового покрытия необходимо ограничивать погонную энергию сварки, выбирать электродные

материалы соответственно назначению изделий, вести процесс сварки и пайки в нейтральной или восстановительной по отношению к цинку среде. Современные способы дуговой сварки и пайки оцинкованных сталей и оборудование, оснащенное управляемыми тиристорными источниками тока, обеспечивают высокую устойчивость горения дуги на малых (30...80 А) токах и управляемый перенос электродного металла. Для компенсации потерь производительности процесса сварки и повышения стабильности горения дуги необходимо цифровое управление отрывом капли с торца электродной проволоки. Использование электродных материалов из сплавов железа, меди, алюминия и цинка применительно к соединениям оцинкованных деталей и узлов теплотрасс не обеспечивает полный комплекс необходимых коррозионных и прочностных свойств, поэтому технологические процессы необходимо строить по принципу компромисса. Ограничить окисление цинка можно использованием инертной газовой защиты не только расплавленного металла, но и участков металла, нагретых свыше 200 °С. Дуговую сварку и пайку оцинкованных сталей целесообразно выполнять при рационально организованной защите зоны нагрева инертным газом, расход которого должен быть ограничен (4...5 л/мин) для обеспечения ламинарного режима истечения газа при использовании горелки с цилиндрическим соплом диаметром 18...20 мм. Требование равнопрочности соединений из тонколистовой оцинкованной стали может обеспечиваться технологией импульсно-дуговой сварки в среде $Ar + O_2$ электродной проволокой диаметром 1,0 и 1,2 мм на умеренных режимах ($I_{св} = 30...40$ А, $U_d = 18...20$ В, $V_{св} = 0,01$ м/с), а шов и поврежденные участки покрытия после сварки следует защищать цинконаполненными (90 % порошка цинка) составами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование и строительство тепловых сетей бесканальной прокладки из стальных труб с промышленной тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке. Свод правил по проектированию и строительству: СП 41-105-2002. – М.: Гос. комитет Рос. Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу, 2003. – 164 с.
2. Тепловые сети бесканальной прокладки из стальных труб, предварительно термоизолированных пенополиуретаном в полиэтиленовой оболочке. Правила проектирования и монтажа. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2008. – 140 с.
3. Конопко, Н.А. Теплоснабжение / Н.А. Конопко. – Минск: Выш. шк., 1988. – 312 с.
4. Сафонов, А.П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям / А.П. Сафонов. – М.: «Энергоатомпромиздат», 1985. – 180 с.
5. О дополнительных мерах по экономному и эффективному использованию топливно-энергетических ресурсов: постановление Совета Министров Респ. Беларусь 27 декабря 2002 г. № 1820.
6. Павлюк, С.К. Закономерности процесса повреждения и разрушения цинкового покрытия на стали при сварке плавлением и дуговой пайке / С.К. Павлюк, А.В. Лупачёв, Ю.А. Цумарев // Вестн. Белорусско-Российского ун-та. – 2008. – № 2(19). – С. 76 – 84.
7. Теория сварочных процессов: учебник для вузов по спец. «Оборудование и технология сварочного производства» / под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. – 559 с.
8. Кох, Б.А. Основы термодинамики металлургических процессов сварки / Б.А. Кох. – Л.: Судостроение, 1975. – 240 с.
9. Бондаренко, В.Л. Инверторное оборудование с частотой преобразования более 100 кГц с и цифровым управлением / В.Л. Бондаренко // Сварщик. – 2007. – № 6(58). – С. 26 – 31.
10. Matusiak, J. Сварка и пайко-сварка материалов и элементов, чувствительных к теплоте, низкоэнергетичными методами Mig/Mag / J. Matusiak, B. Czworong, T. Pfeifer // Сварщик. – 2008. – № 4(62). – С. 29 – 31.

Поступила 30.12.2011

ARC WELDING AND SOLDER BENDING OF ZINC-PLATED HEAT PIPELINES UNITS AND THEIR CORROSION STABILITY

A. LUPACHEV, S. PAVLUK

Distinctive damage areas of zinc coating on steel under arc welding and solder bending are determined. Dependences of damage area widths on parameters of process conditions are detected. The maximum width of zinc coating damage providing the work of the anode shield is determined. Corrosive and mechanical properties of welded and soldered joints zinc-coated steel in corrosion environment, performed by means of high-powered methods of arc welding and solder bending using new electrode material on the basis of iron, copper, aluminium, zinc and state-of-the-art equipment as applied to heat pipeline construction are investigated and estimated. Ways to minimizing of pavement distress without losses in productivity and approximation of corrosion stability of the junction to firmness of parent metal by means of heat-enclosure regulation and seam composition are developed.

УДК 621.791.763.1

**О ВЛИЯНИИ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ
НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ**

*д-р техн. наук, проф. В.П. БЕРЕЗИЕНКО,
канд. техн. наук, доц. С.М. ФУРМАНОВ, канд. техн. наук Т.И. БЕНДИК
(Белорусско-Российский университет, Могилёв);
Е.Л. ВОРОНОВ
(Завод «Могилевлифтмаши», Могилёв)*

Исследуется процесс контактной точечной сварки, при котором для устранения вмятин со стороны лицевой поверхности изделия применяется электрод со значительно увеличенной рабочей площадью контакта. Разработана математическая модель контактной точечной сварки, позволяющая изменять условия охлаждения электродов. Установлено, что интенсивное охлаждение электродов приводит к уменьшению степени деформирования поверхностей деталей при сварке. Показано, что при применении электрода со значительно увеличенной площадью контакта и его интенсивного охлаждения происходит некоторое смещение литого ядра относительно границы контакта деталь – деталь и появляется выпуклость на лицевой поверхности изделия высотой 20...25 мкм. Экспериментально установлено, что применение данного электрода со стороны лицевой поверхности изделия в заводских условиях позволяет исключить операцию шлифовки перед покраской.

Введение. Контактная точечная сварка широко применяется на производстве и характеризуется высокой производительностью и экономической эффективностью. Однако в местах постановки сварных точек образуются вмятины от токоподводящих электродов. Величина их достигает 15...20 %, а при нарушениях технологического процесса до 30...40 % от толщины детали. Деформации лицевых поверхностей ухудшают товарный вид изделий и приводят к необходимости их зачистки и доработки после сварки, что повышает материальные затраты и снижает производительность труда. Снизить деформации лицевых поверхностей изделий можно за счет значительного увеличения площади контакта электрода с деталью и улучшения условий его охлаждения, что приводит к уменьшению величины максимального температурного расширения материала электрода в месте постановки сварной точки.

Основная часть. Глубина вмятин от электродов зависит от температуры свариваемого металла в зоне контакта электрод – деталь. Проведенные исследования с использованием математического моделирования [1 – 5] показали, что она значительно снижается при использовании жестких режимов сварки, зависит от величины сварочного и ковочного усилий, начального зазора между свариваемыми деталями, размеров контактной поверхности электродов. Известно, что при повышении температуры растет пластичность металлов. Предел текучести σ_T стали 08 пс при комнатной температуре составляет 240 МПа, при температуре 200 °С – 220 МПа, а при 300 °С резко снижается до 150 МПа. Снижение σ_T при повышенных температурах способствует увеличению пластической деформации нагретого металла и росту глубины вмятины. Даже самый поверхностный анализ кривых $\sigma_T = f(T)$ показывает, что для уменьшения глубины вмятин при сварке низкоуглеродистых сталей максимальная температура в контакте электрод – деталь со стороны лицевой поверхности не должна превышать 250 °С. При сварке нержавеющей сталей температура может быть несколько выше.

В сварочных машинах с распорными пистолетами и в многоэлектродных машинах часто применяют один из электродов с увеличенной рабочей поверхностью. Данный способ на протяжении определенного времени позволяет значительно уменьшать вмятину с одной стороны изделия [5]. С целью изучения процессов, протекающих при указанном способе, нами была построена математическая модель процесса сварки с применением электрода с увеличенной рабочей поверхностью (рис. 1, а). Распределение температурного поля при сварке деталей из низкоуглеродистой стали 08 пс толщиной 1,5 + 1,5 мм показано на рисунке 1, б; деформационная картина точечного соединения – на рисунке 1, в. Основные параметры режима: сварочный ток $I_{CB} = 12$ кА, время протекания тока $\tau_{CB} = 0,16$ с, диаметр контактной поверхности электрода $d_э = 6$ мм, усилие сжатия электродов $F_{CB} = 3,5$ кН.

На модели к торцу верхнего электрода 1 приложено распределенное усилие сжатия, а торец электрода 4 с увеличенной рабочей поверхностью неподвижно закреплен. По этим же границам задается зона водяного охлаждения. Зона теплогенерации ограничена размерами площади контакта электрода 1 с верхней деталью 2. Лицевая поверхность соединения располагается со стороны нижней детали 3.

При моделировании температурных полей учитывалось, что сварка и последующее остывание деталей происходит в водоохлаждаемых электродах из бронзы марки БрХЦр, свойства которой также задавались в зависимости от температуры.

Результаты моделирования показали, что в первый момент нагрева значительно увеличивается отвод теплоты в электрод с увеличенной рабочей поверхностью при его соприкосновении с деталью. Условия нагрева существенно изменяются также за счет снижения плотности тока со стороны данного электрода. Происходит некоторое смещение расплавленного ядра относительно границы контакта деталь – деталь (см. рис. 1, б). При достаточном нагреве, когда проявляется дилатометрический эффект в месте сварки, теплоотвод в электрод с увеличенной поверхностью снижается.

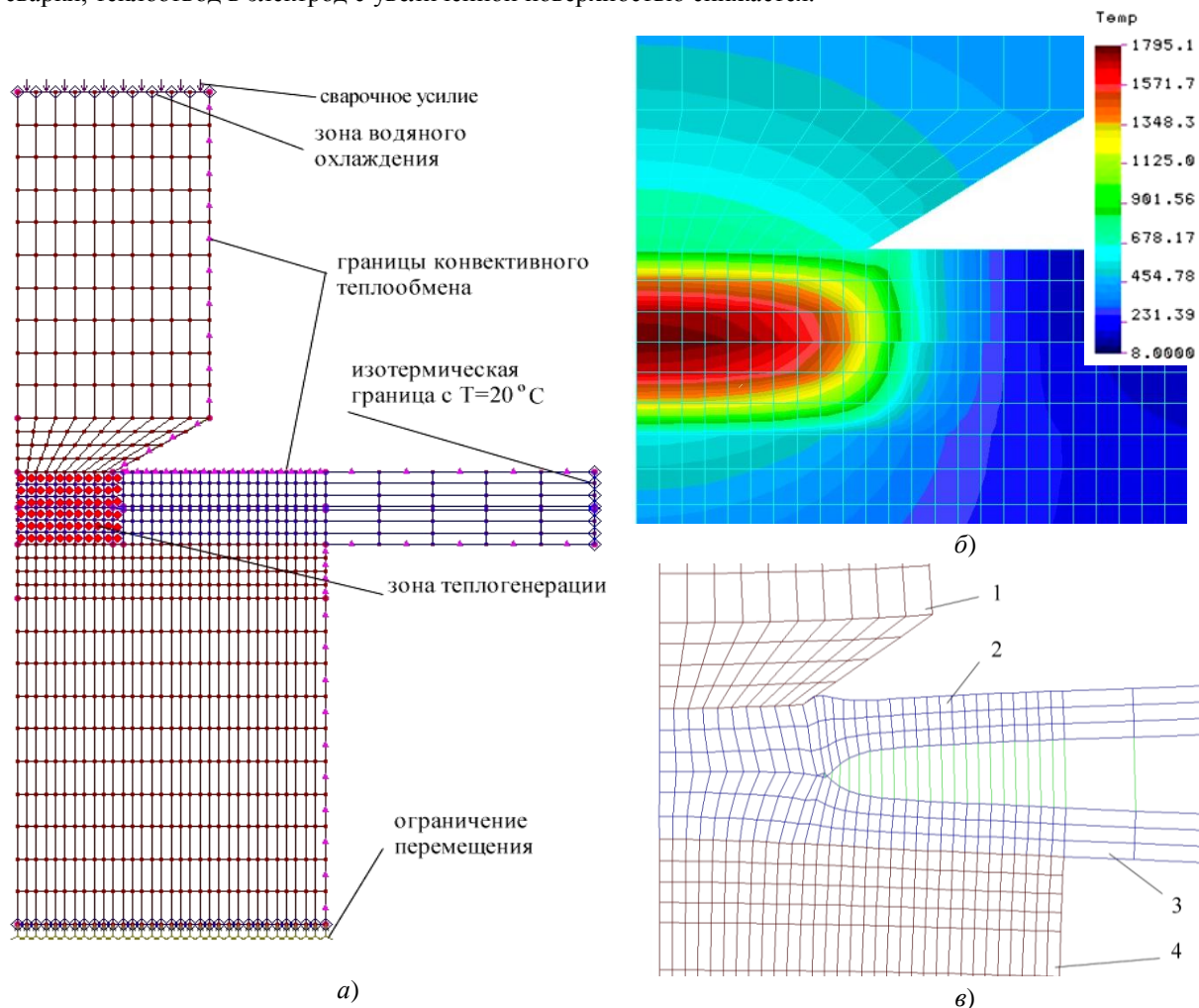


Рис. 1. Математическая модель процесса точечной сварки с применением со стороны лицевой поверхности изделия электрода с увеличенной рабочей поверхностью (а), смещение расплавленного ядра в сторону электрода с меньшей контактной поверхностью (б), деформационная картина точечного соединения при максимальном тепловом расширении деталей (в)

Распределение температур по контактной поверхности электрода представлено на рисунке 2, а. При прохождении тока из-за большой площади контакта он нагревается неравномерно. Максимальная температура в его центральной части может достигать 550...600 °С, а периферийная часть нагревается до 100...120 °С. Тепловое расширение материала электрода с увеличенной рабочей поверхностью в ходе цикла сварки показано на рисунке 2, б. В момент включения сварочного тока начинается тепловое расширение материала электрода, которое длится вплоть до момента выключения тока. Причем в центре контакта электрод – деталь оно составляет около 0,043 мм, а на периферии контакта – около 0,023 мм. В связи с этим давление в зоне контакта перераспределяется, и усилие сжатия прикладывается в основном к центральной части электрода (см. рис. 1, в). В интервале температур от 500 до 600 °С резко снижается предел текучести бронзы БрХЦр, что вызывает пластическое деформирование центральной части электрода, где появляется небольшое углубление. При дальнейшей постановке сварных точек углубление продолжает расти. Поэтому в процессе сварки необходимо постоянно следить за состоянием электрода с увеличенной поверхностью. При его износе и появлении на нем углубления изменяются условия теплоотвода, что приводит к смещению литого ядра относительно плоскости соединения листов и существенному снижению прочности. Это особенно сказывается при сварке деталей неравной толщины. Углубление, образующееся на поверхности электрода, является также причиной уменьшения его начальной

площади контактирования с поверхностью изделия. При этом происходит перераспределение плотности электрического тока в зоне контакта электрод – деталь и увеличение контактного сопротивления. Поэтому для получения качественного соединения необходимо повышение величины усилия сжатия электродов.

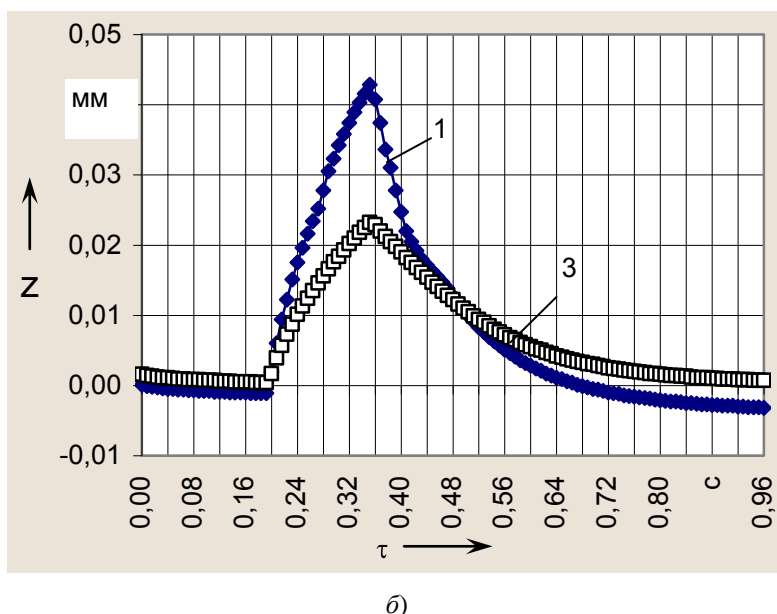
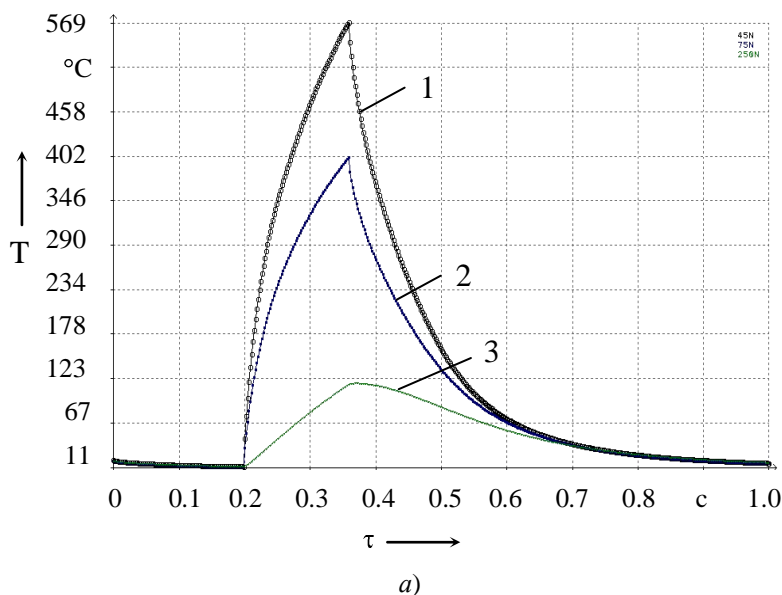


Рис. 2. Распределение температур по поверхности электрода с увеличенной площадью контакта (а) и его тепловое расширение (б):

1 – в центре контакта электрод – деталь; 2 – на расстоянии $r = 2,5$ мм от центра; 3 – на границе электрода

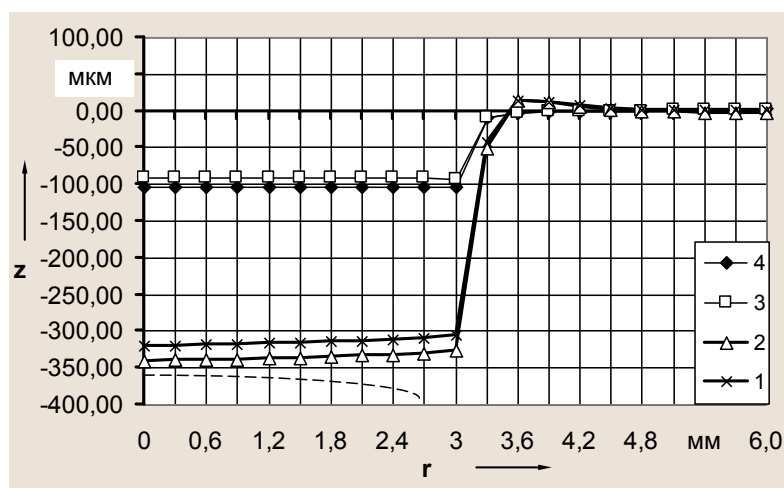
Существенным недостатком данного способа сварки, кроме того, является образование со стороны электрода с меньшей площадью контакта чрезмерно глубокой вмятины, величина которой может достигать 30...35 % от толщины детали. При этом со стороны электрода с увеличенной площадью контакта на лицевой поверхности изделия образуется выпуклость. Глубокие односторонние вмятины приводят не только к ухудшению прочностных свойств соединения из-за сильного утонения одной из деталей в месте постановки сварных точек, но и способствуют увеличению общих деформаций свариваемых деталей.

Во время протекания сварочного тока происходит интенсивное тепловое расширение как материала электрода с увеличенной рабочей поверхностью в центре контакта электрод – деталь, так и свариваемого металла в этой зоне. При этом температура поверхностных слоев свариваемого металла обычно на 150...200 °C выше, чем температура поверхности электрода. Поэтому происходит образование углубления на лицевой поверхности соединения. После полного остывания деталей и усадки металла углубление может дости-

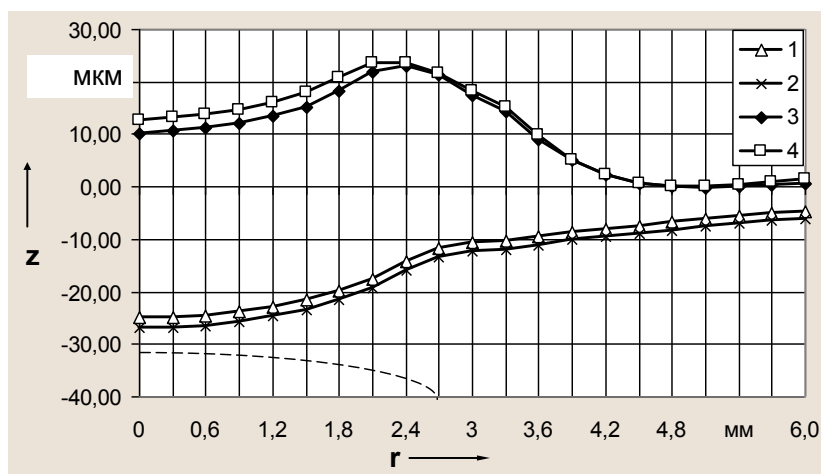
гать 4...5 % от толщины детали. Снизить деформации лицевых поверхностей изделий и износ электродов можно за счет улучшения условий охлаждения электродов. Это приводит к уменьшению величины максимального температурного расширения материала электрода в его центральной части (см. рис. 2, б).

Оценка влияния условий охлаждения электрода с меньшей площадью контакта на характер деформирования поверхности детали с помощью математической модели показана на рисунке 3, а. Пунктиром на рисунках условно обозначено расположение литого ядра. При охлаждении торцов электродов на модели до 8 и 22 °С глубина вмятины составляла соответственно 320 и 340 мкм, или 20...23 % от толщины детали. Расстояние от торца электрода до контакта электрод – деталь составляло 15 мм. При полном интенсивном охлаждении электродов до неизменной температуры 8 и 22 °С вмятина уменьшилась соответственно до 90 и 100 мкм, что составило 6...7 % от толщины детали.

Влияние условий и температуры охлаждения электрода с увеличенной площадью контакта на характер деформирования лицевой поверхности детали показано на рисунке 3, б. При охлаждении торца электрода до 8 и 22 °С (кривые 1, 2) на лицевой поверхности детали образуется углубление размером 25 ...27 мкм. При полном охлаждении электрода до 8 и 22 °С на лицевой поверхности появляется выпуклость высотой 20...25 мкм (кривые 3, 4). Таким образом, интенсивность охлаждения электродов оказывает существенное влияние на характер деформирования поверхностей деталей.



а)



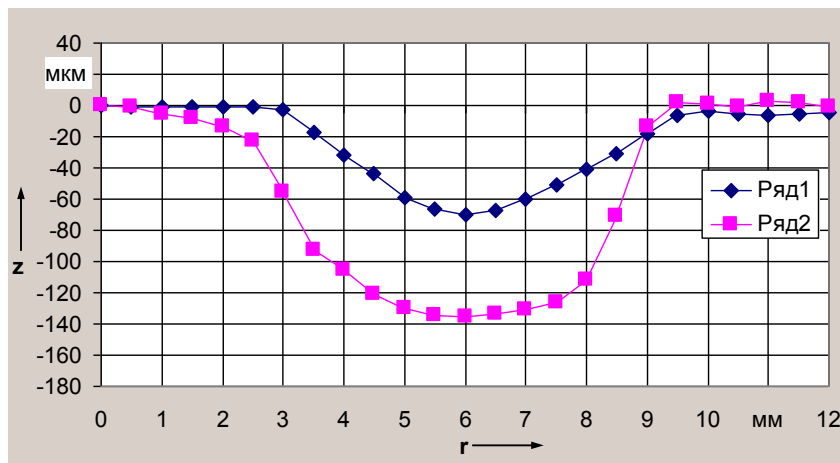
б)

Рис. 3. Влияние условий охлаждения электрода с меньшей площадью контакта (а) и электрода с увеличенной площадью контакта (б) на характер деформирования поверхности детали: при охлаждении торцов электродов до 8 °С (1) и 22 °С (2); при полном охлаждении электродов до 8 °С (3) и 22 °С (4)

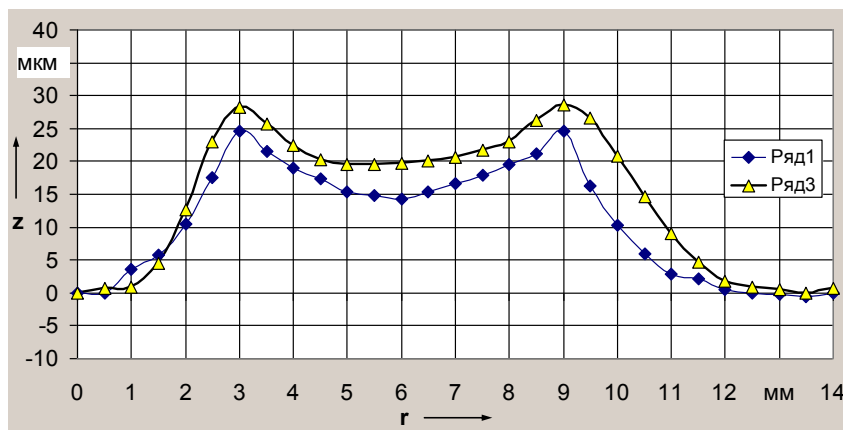
Экспериментальная проверка результатов математического моделирования производилась на установке для контактной точечной сварки SEMSA ROOF на заводе «Могилевлифтмаш». В качестве электрода со стороны лицевой поверхности детали использовался большой медный рабочий стол. Образцы из низкоуглеродистой стали толщиной 1,5 + 1,5 мм сваривались при следующих параметрах режима:

сварочный ток $I_{CB} = 12$ кА, время протекания тока $\tau_{CB} = 0,16$ с, диаметр контактной поверхности электрода $d_{\Sigma} = 6$ мм, усилие сжатия электродов $F_{CB} = 3,5$ кН.

Зависимость величины вмятины на поверхности детали со стороны электрода с меньшей площадью контакта показана на рисунке 4, а; величина выпуклости на лицевой поверхности детали со стороны электрода с увеличенной площадью контакта – на рисунке 4, б. Для регулирования температуры охлаждения электродов в составе машины для контактной сварки применялась специальная холодильная установка. Электроды охлаждались соответственно до температур 8 и 22 °С.



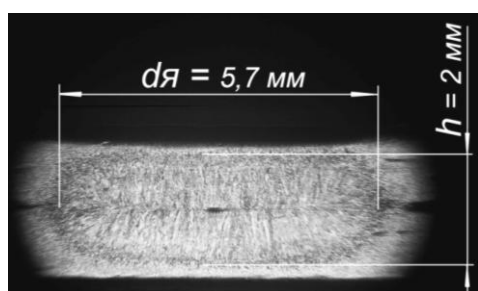
а)



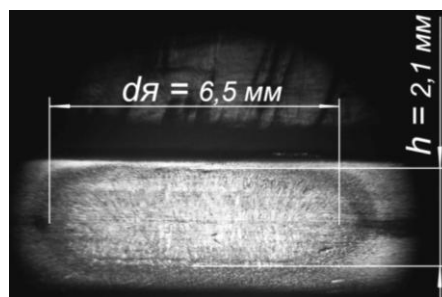
б)

Рис. 4. Зависимость величины вмятины на поверхности детали со стороны электрода с меньшей площадью контакта (а) и величины выпуклости на лицевой поверхности детали со стороны электрода с увеличенной площадью контакта (б) от температуры охлаждения 8 и 22 °С электродов 1 и 2 соответственно

Макрошлифы сварных соединений из стали 08 пс толщиной 1,5 + 1,5 мм, полученных при сварке с охлаждением электродов до температуры 8 и 22 °С, представлены на рисунке 5.



а)



б)

Рис. 5. Макрошлифы сварных соединений из стали 08 пс толщиной 1,5 + 1,5 мм при точечной сварке с охлаждением электродов до температуры 8 °С (а) и 22 °С (б)

При уменьшении температуры охлаждения электродов от 22 до 8 °С глубина вмятины со стороны обычного электрода уменьшилась на 50 %, высота выпуклости на лицевой поверхности изделия – на 25 %. При этом обеспечиваются требуемый диаметр литого ядра и глубина проплавления.

Применение со стороны лицевой поверхности изделия электрода со значительно увеличенной поверхностью контакта и интенсивного охлаждения электрода до температуры 8 °С позволили на заводе «Могилевлифтмаш» применить контактную точечную сварку при изготовлении створки дверей лифта, панелей и других узлов, к внешнему виду которых предъявляются повышенные требования. При этом исключена операция шлифовки лицевых поверхностей перед покраской.

Заключение. Проведенное исследование показало, что интенсивное охлаждение электродов приводит к уменьшению степени деформирования поверхностей деталей при контактной точечной сварке. При использовании электрода с увеличенной площадью контакта со стороны лицевой поверхности изделия происходит некоторое смещение литого ядра относительно границы контакта деталь – деталь, и появляется выпуклость высотой 20...25 мкм. Со стороны электрода с меньшей рабочей поверхностью величина вмятины составляет 6...7 % от толщины детали.

Установлено, что применение со стороны лицевой поверхности изделия электрода со значительно увеличенной поверхностью контакта и его интенсивного охлаждения до температуры 8 °С позволяет исключить операцию шлифовки перед покраской.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор режимов 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. Методика программного управления процессом контактной точечной сварки / В.П. Березиенко [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 139 – 144.
3. Березиенко, В.П. Уменьшение глубины вмятин от электродов при контактной точечной сварке / В.П. Березиенко, С.М. Фурманов // Сварочное производство. – 2003. – № 9. – С. 20 – 26.
4. Фурманов, С.М. О разработке оборудования для контактной точечной сварки без вмятин на лицевых поверхностях изделий / С.М. Фурманов, В.П. Березиенко // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы второго междунар. науч.-практ. семинара. – СПб., 2005. – С. 15 – 20.
5. Березиенко, В.П. Технология сварки давлением: учеб. пособие / В.П. Березиенко, С.Ф. Мельников, С.М. Фурманов. – Могилев: ГУВПО «Белорус.-Рос. ун-т», 2009. – 256 с.

Поступила 16.06.2011

ABOUT INFLUENCE CONDITIONS COOLING OF THE ELECTRODES ON CHARACTER DEFORMATION OF THE SURFACES OF DETAILS IN RESISTANCE SPOT WELDING

V. BEREZIENKO, S. FURMANOV, T. BENDIK, E. VORONOV

Article is devoted research of the resistance spot welding process at which the electrode is applied to elimination of dents from an obverse surface of a product with considerably increased working area of contact. The mathematical model of the resistance spot welding is developed, allowing changing conditions of cooling of electrodes. It is established, that intensive cooling of electrodes leads to reduction of degree of deformation of the surfaces of details at welding. It is shown, that at application of an electrode with considerably increased area of contact and its intensive cooling there is some displacement of a cast kernel concerning border of contact a detail-detail, and there is a camber on an obverse surface of a product in height 20...25 microns. It is experimentally established, that application of the given electrode from an obverse surface of a product industrially allows excluding grinding before painting.

УДК 621.926

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ В СРЕДНЕХОДНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

канд. техн. наук В.С. ФРАНЦКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований энергетики процесса измельчения в валковой среднеходной мельнице. Разработана модель разрушения материала под воздействием давления, создаваемого вращающимися валками, впервые учитывающая как кратность воздействия при изменении степени измельчения и удельной поверхности, так и затраты энергии на неупругие деформации, работу сил трения и создание новых поверхностей. На основе модели предложена методика расчета энергозатрат на процесс разрушения материала. Расчеты энергозатрат на измельчение показали хорошую сходимость не только с экспериментальными данными, но и со сведениями по эксплуатируемым за рубежом валковым мельницам.

Введение. Как известно, характерными достоинствами среднеходных мельниц являются сравнительно малые габариты установок, простота монтажа, высокая приспособленность к автоматизации, низкий уровень шума. Они характеризуются более низкими удельными энергозатратами, малым износом размольных элементов, занимают меньше места на единицу мощности и требуют значительно меньших капиталовложений. Возможность гибкого регулирования режимов работы с малой инерционностью при изменении производительности, т.е. высокая маневренность, также является важным преимуществом среднеходных мельниц. Эти машины работают в замкнутом цикле с воздушным сепаратором, легко перестраиваются на требуемую тонкость помола и часто используются в качестве помольно-сушильных комплексов с пневмотранспортом готового продукта. В настоящее время за рубежом выпускаются среднеходные валковые мельницы производительностью до 500 т/ч [1; 2].

Затраты энергии на процесс помола, в том числе и в валковых мельницах, выступают в качестве основного показателя, характеризующего эффективность работы помольного агрегата. В настоящее время при расчете мощности привода среднеходной валковой мельницы приходится пользоваться эмпирическими зависимостями, полученными ранее [3]. В тех немногочисленных работах, в которых исследовались эти агрегаты, не делались даже попытки связать энергозатраты с теоретическими аспектами разрушения и дезинтеграции.

Анализ моделей разрушения монокристаллических тел и монокристаллов показывает, насколько сложен и мало изучен этот процесс и насколько тяжело его описать математически. Поэтому большинство моделей идеализировано, в них не учитывается весь спектр факторов, влияющих на процесс разрушения. Путем теоретического рассмотрения неустойчивости микро- и макротрещин в поле напряжений удалось достигнуть некоторых успехов в объяснении основных закономерностей процесса разрушения. Однако все теоретические модели разрушения дают лишь качественную характеристику процесса, не являясь основой для количественной оценки прочности.

Главным вопросом процесса дезинтеграции остается установление количественной связи между гранулометрическим составом конечного продукта и энергоемкостью процесса. К сожалению, и это подчеркивается в работе [4], успехи в этом направлении незначительны. Мы до сих пор продолжаем использовать гипотезы, высказанные полторы сотни лет тому назад Риттингером и Киком и позднее – Бондом.

Основная часть. В настоящее время при теоретических исследованиях процесса измельчения чаще используют гипотезу Ребиндера. Преимущество уравнения Ребиндера перед вышеперечисленными тремя законами заключается в аддитивном принципе ее построения, подчеркивающим многофакторность процесса разрушения. В этой зависимости учтена и деформация, и образование новой поверхности как процессы, характеризующие собирательное явление, называемое разрушением. Уравнение Ребиндера использовано Осокиным [5] применительно к мельницам ударного действия для оценки удельных энергозатрат. Причем по сравнению с базовым вариантом им дополнительно учтена кратность воздействия на разрушаемый материал. При этом работа измельчения:

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E} \cdot n_g + w_s \cdot S - S_H, \quad (1)$$

где A – работа измельчения, Дж; σ , E – соответственно предел прочности и модуль упругости материала, Па; V – объем измельчаемого материала (остается неизменным в процессе измельчения), м³; n_g – кратность воздействия; w_s – удельная поверхностная энергия, Дж/м²; S_H , S – начальная и текущая поверхности измельчаемого материала, м².

Данная зависимость учитывает энергию, затрачиваемую на упругие деформации и образование новой поверхности. Но, как известно, разрушение твердых материалов сопровождается еще и пластической деформацией, на которую затрачивается некоторая доля подводимой к ним энергии. Амorfизация и другие изменения кристаллической структуры, наблюдаемые при измельчении ряда твердых материалов, позволяют считать наличие заметной пластической деформации при тонком измельчении достаточно общим явлением. Наряду с этим имеются и другие затраты энергии, в частности потери на работу трения и разрушение агломератов. Ходаковым [6] было предложено уравнение для плотности энергии измельчения в общем виде

$$dw_v = \frac{9bw_{vy}}{a_2} \cdot \frac{dS}{S} + \left(\frac{3bw_{vp} + w_{st}}{a_2} + w_{st} \right) \cdot dS + \frac{bw_{vp}l_1^2}{4a_2} \cdot S \cdot dS, \quad (2)$$

где b – объемный фактор формы; w_{vy} – плотность энергии пластической деформации; dS – прирост площади поверхности при разрушении; w_{vp} – плотность энергии пластических деформаций, предшествующих хрупкому разрушению; a_2 – коэффициент; w_{st} – поверхностная плотность работы сил трения и энергии образования и разрушения агрегатов; w_s – свободная энергия единицы площади поверхности; $l_1 = \frac{2 \cdot l}{a_1}$ – коэффициент; l – толщина слоя пластической деформации; S – текущая поверхность измельчаемого материала, m^2 .

В данной зависимости первый член представляет собой затраты энергии на объемное деформирование твердого тела, второй – затраты энергии на неупругие деформации, работу сил трения и создание новых поверхностей, третий учитывает изменение объема области пластических деформаций в связи с изменением размеров частиц.

Для оценки вклада неучтенных ранее статей затрат на суммарную работу разрушения было получено уравнение для плотности энергии измельчения трансформированное непосредственно для мельниц раздавливающего типа:

$$w_v = \frac{9bw_{vy}}{a_2} \cdot \left(\ln \frac{S}{S_0} + \ln \frac{S_{max} - S_0}{S_{max} - S} \right) + \frac{S_{max}}{a_2} \cdot \left(3bw_{vp}l_1 + a_2w_s \right) \cdot \ln \frac{S_{max} - S_0}{S_{max} - S}, \quad (3)$$

где S_0, S_{max} – начальная и максимально возможная поверхности измельчаемого материала, m^2 . Тогда полная работа за один оборот размольного стола среднеходной мельницы будет равна [2]

$$A_\Sigma = w_v V n \cdot \frac{360}{\varphi_1} \cdot \frac{R_T}{R}, \quad (4)$$

где R_T – радиус беговой дорожки стола, м; n – количество циклов измельчения; φ_1 – угол захвата куска материала валком ($\varphi_1 = 2\varphi$, где φ – угол трения, который зависит от коэффициента трения f материала о валок, $\varphi = \text{arctg } f$; R – радиус размольного вала, м.

Определенную сложность в предложенной формуле расчета работы измельчения вызывает определение количества циклов воздействия на материал. Нами был разработан метод расчета этого параметра применительно к валковым измельчителям. Рассмотрим схему воздействия вала на материал (рис. 1).

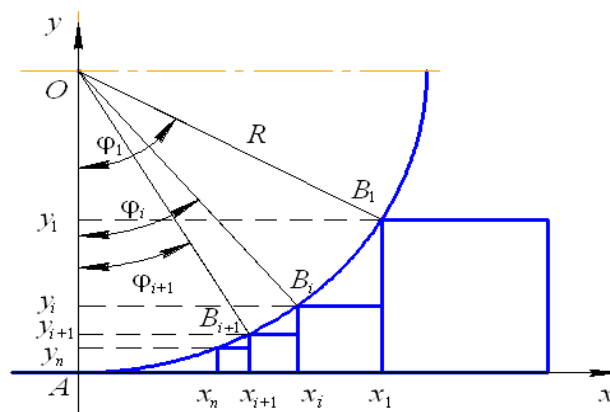


Рис. 1. Схема воздействия вала на материал

Максимальный размер куска материала $y_n = y_1$, который может затянута под валок, определяется для измельчителей такого типа по углу захвата φ_1 . Соотношение между диаметром валка $D = 2R$ и размером максимального куска по аналогии с бегунами можно рассчитать по формуле:

$$\frac{y_n}{2R} = \frac{1 - \cos \varphi}{1 + \cos \varphi}. \quad (5)$$

Валок воздействует на материал по дуге AB_1 . При перекачивании валка по материалу с соответствующей силой прижатия его размер должен уменьшаться от y_1 до y_n . Но это уменьшение происходит постепенно по мере уменьшения зазора между валком и тарелкой. Так как измельчить частицы от размеров y_1 до y_n за один цикл невозможно, воздействие части валка в виде сектора с углом φ_1 и дугой AB_1 можно представить как многоцикловой процесс. Примем по аналогии с классической теорией измельчения допущение, что частицы после каждого цикла воздействия имеют кубическую форму. Тогда кратность воздействия определяется количеством кубиков, уменьшающихся размеров, размещившихся между плоскостью тарелки (ось x) от x_1 до x_n и дугой окружности валка. Количество контактов валка с частицами материала (точки $B_1, \dots, B_i, \dots, B_n$) как раз соответствуют кратности воздействия.

Координаты любой точки соприкосновения определяются по формуле:

$$\begin{aligned} x_i &= R \cdot \sin \varphi_i; \\ y_i &= R - R \cdot \cos \varphi_i. \end{aligned} \quad (6)$$

При этом должно выполняться условие:

$$x_i - x_{i+1} = y_{i+1}. \quad (7)$$

Подставляя значения координат из уравнений (6), получим

$$R \cdot \sin \varphi_i - R \cdot \sin \varphi_{i+1} = R + R \cdot \cos \varphi_{i+1}, \quad (8)$$

или

$$\cos \varphi_{i+1} - \sin \varphi_{i+1} = 1 - \sin \varphi_i. \quad (9)$$

Преобразование разницы двух тригонометрических функций угла φ_{i+1} дает

$$\sqrt{2} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} - \varphi_{i+1} \right) = 1 - \sin \varphi_i. \quad (10)$$

В общем виде для любой последующей точки контакта можно записать:

$$\varphi_{i+1} = \frac{\pi}{4} \arcsin \frac{1 - \sin \varphi_i}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Так, пройдя весь участок от x_1 до x_n , мы найдем количество контактов, соответствующее по принятой модели кратности n воздействия валка на материал.

Поверхность после каждого цикла воздействия увеличивается и согласно [5] становится равной

$$S_{i+1} = i_i S_i, \quad (12)$$

где $i_i = \frac{y_i}{y_{i+1}}$ – степень измельчения.

Рассчитав, таким образом, поверхность при каждом цикле воздействия, определим S_n – конечную поверхность, соответствующую размеру частиц y_n .

Начальная поверхность $S_1 = 6y_1^2 z_1$, где z_1 – количество кубиков начального размера y_1 , размещающихся по ширине катка B , составит

$$z_1 = \frac{B}{y_1}. \quad (13)$$

Тогда

$$S_1 = 6y_1 B. \quad (14)$$

Объем материала в процессе измельчения не меняется, и его можно рассчитать по начальным размерам:

$$V = y_1^3 \cdot \frac{B}{y_1} = y_1^2 B. \quad (15)$$

Таким образом, мы имеем все параметры для того, чтобы по уравнениям (3), (4) определить работу измельчения при воздействии валка на материал в пределах сектора, соответствующего углу захвата ϕ_1 .

Мощность, затрачиваемую на измельчение, определим следующим образом:

$$P = A_{\Sigma} \cdot n_T, \quad (16)$$

где n_T – частота вращения размольной тарелки, об/с.

Для проверки адекватности предложенной модели измельчения были проведены экспериментальные исследования на лабораторной валковой мельнице с диаметром размольной тарелки 214 мм, валков 150 мм по методике, изложенной в работе [7]. В процессе опытов изменялась скорость газа в мельнице, частота вращения тарелки, усилие прижатия валков. В качестве измельчаемого материала использовался цементный клинкер фракции 2...5 мм. При варьировании указанных выше параметров замерялись силовые характеристики привода мельницы. Одновременно по разработанной нами методике для лабораторной мельницы была рассчитана теоретическая мощность, затрачиваемая на измельчение клинкера. Некоторые результаты расчета энергозатрат на измельчение, проведенного по предложенной методике, представлены на рисунке 2.

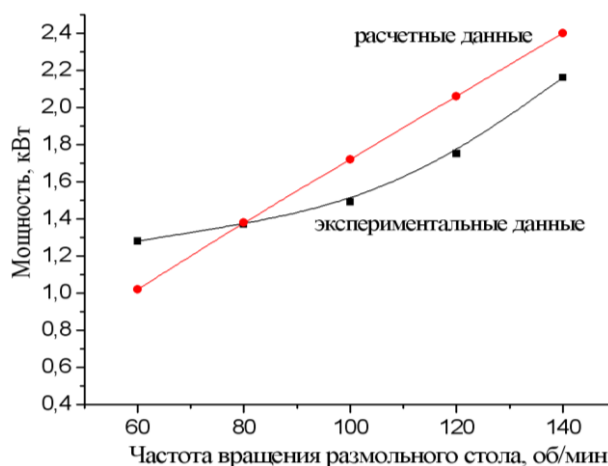


Рис. 2. Зависимость экспериментальной и расчетной мощностей от частоты вращения размольного стола среднеходной мельницы

Сравнение теоретической и экспериментальной мощности показывает, что значения последней несколько ниже. Несмотря на эту разницу, сходимость результатов можно считать вполне удовлетворенной. Например, у Осокина [5] расчетные и экспериментальные значения отличались на два порядка. Модель, разработанная нами, более адекватна с точки зрения физики процесса, поскольку на каждом цикле воздействия учитывались изменения степени измельчения и удельной поверхности одновременно. Разницу можно объяснить тем, что при расчете использовались усредненные табличные физические характеристики материала, которые могут значительно отличаться от реальных значений.

Кроме того, по предложенной методике были проведены расчеты теоретической мощности привода промышленной мельницы с диаметром размольной тарелки 1 м, которая составила около 170 кВт, что соответствует удельному расходу энергии 10...15 кВт·ч/т при помоле клинкера.

Заключение. Разработана модель разрушения материала под воздействием давления, создаваемого вращающимися валками, впервые учитывающая как кратность воздействия при изменении степени измельчения и удельной поверхности, так и затраты энергии на неупругие деформации, работу сил трения и создание новых поверхностей. На основе представленной модели предложена методика расчета энергозатрат на процесс разрушения материала.

Сравнение полученных данных с известными сведениями по эксплуатируемым за рубежом валковым среднеходным мельницам свидетельствует о хорошей сходимости полученных результатов [8], что

подтверждает возможность использования предложенной методики для расчета энергозатрат на измельчение различных материалов в данных агрегатах. Кроме того, используя предложенную методику при расчете работы измельчения и сравнив полученные данные с затратами энергии на упругую деформацию и увеличение удельной поверхности при разрушении материала, возможно оценить вклад затрат энергии на пластические деформации и работу сил трения для любого материала, измельчаемого в мельницах раздавливающего типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kotowski, C. Gleichzeitige Herstellung von Kalksteinmehl und Kornungen minns 1,2 mm mit einer MPS – Walzenschussenmuhlen / C. Kotowski, U. Schnabel, Y. Reichardt // Zement – Kalk – Gips int. – 2003. – Jhrg. 56, № 6. – S. 73 – 75.
2. Йоргенсен, С.В. Вертикальная мельница для помола цемента и шлака / С.В. Йоргенсен // Цемент и его применение. – 2005. – № 3. – С. 22 – 26.
3. Летин, Л.А. Среднеходные и тихоходные мельницы / Л.А. Летин, К.Ф. Роддатис. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
4. Селективное разрушение минералов / В.И. Ревнивцев [и др.]; под ред. В.И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1988. – 286 с.
5. Осокин, В.П. Молотковые мельницы / В.П. Осокин. – М.: Энергия, 1980. – 176 с.
6. Ходаков, Г.С. Физика измельчения / Г.С. Ходаков. – М.: Наука, 1972.
7. Вайтехович, П.Е. Исследование влияния работы параметров валковых мельниц на удельные энергозатраты / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Строительная наука и техника. – 2007. – № 2. – С. 21 – 24.
8. Янг, О. Разработки и производственный опыт использования вертикальных валковых мельниц в цементной промышленности / О. Янг, Р. Биссо // Цемент и его применение. – 2000. – № 2. – С. 8 – 15.

Поступила 04.10.2011

DESIGN PROCEDURE OF POWER INPUTS ON CRUSHING IN A VERTICAL ROLL MILLS

V. FRANTSKEVICH, P. VAITEKHOVICH

In article results theoretical and experimental researches of power of process of crushing in a vertical roll mill are resulted. The model of destruction of a material under the influence of the pressure created rotating rolls, for the first time considering as frequency rate of influence is developed at change of degree of crushing and a specific surface, and an expense of energy for not elastic deformations, work of forces of a friction and creation of new surfaces on which basis the design procedure of power inputs on process of destruction of a material is offered. Calculations of power inputs on crushing have shown good convergence not only with experimental data, but also with data on maintained abroad to vertical roll mills.

УДК 620.178.3

**К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ
БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5****И.Н. СТЕПАНКИН, В.М. КЕНЬКО, Е.П. ПОЗДНЯКОВ***(Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого);***А.И. КАМКО***(РУП «Гомельский завод литья и нормалей»)*

Исследуются закономерности возникновения повреждений на образцах из стали Р6М5 при их испытаниях на контактную выносливость. Показан механизм накопления структурных повреждений, в частности наклеп материала. Структура металла, претерпевшего наклеп, характеризуется равномерным распределением карбидной фазы в матрице. Кинетика процесса контактного изнашивания поверхности образцов из стали Р6М5 зависит от режимов термической обработки материала. Наиболее высокую способность сопротивления развитию контактной усталости показывают образцы, структура которых отличается высоколегированным мартенситом с карбидными частицами. Наивысшей сопротивляемостью контактной усталости обладает сплав, с высокой степенью завершения структурообразования в процессе термической обработки и мартенситной матрицей, не склонной к динамическому старению, в которой распределены избыточные карбидные частицы.

Введение. Контактная усталость является достаточно распространенной причиной отказа большого количества деталей машин [1]. Она развивается при воздействии пульсирующей нагрузки на поверхность детали. На начальном этапе эксплуатации повреждения в виде питтингов, как правило, не затрагивают глубинные слои материала и накапливаются в поверхностных слоях деталей. Изделиями, отказ которых предопределен контактной выносливостью материала, являются подшипники качения, железнодорожные колеса и рельсы, зубчатые колеса, плунжерные пары, штамповая оснастка и др. Для них важной характеристикой является период эксплуатации, в течение которого сохраняются заданные геометрические параметры прецизионных рабочих поверхностей.

Как известно, механизм зарождения питтинга связан с упругим деформированием поверхностного слоя в области локализации контактной пульсирующей нагрузки и выпучиванием либо растяжением материала в непосредственной окрестности зоны контакта. При этом величина локальной деформации в окрестности зоны контакта обусловлена амплитудой прикладываемой нагрузки и твердостью (жесткостью) материала рассматриваемой детали. В некоторых случаях интенсификация распространения трещин контактной усталости объясняется еще и расклиниванием начальной трещины смазочной жидкостью [1; 2]. В отсутствие смазки основную роль в образовании питтингов играет градиент деформаций в окрестности пятна контакта пульсирующей нагрузки. Величина градиента в таком случае является определяющим фактором, который влияет на предел контактной выносливости материала и зависит от значения контактной нагрузки.

Наибольшие по величине нагрузки возникают на поверхностях штампового инструмента, особенно на операциях холодной объемной штамповки. Присутствие жидкой смазки при проведении холодной высадки и выдавливания способствует распространению микротрещин, формирующих питтинг. Кроме этого сказывается негативное влияние остаточного аустенита, который присутствует в структуре высоколегированных инструментальных сталей после завершения всех операций термической обработки. Динамическое старение аустенита в условиях пульсирующего контактного воздействия на рабочую поверхность штампа сопровождается появлением внутрикристаллических дефектов, которые, скапливаясь в окрестности ледебуритных карбидов полутеплостойких штамповых и быстрорежущих сталей, ускоряют процесс зарождения поверхностных трещин в материале [3].

В большинстве случаев начальный этап развития контактной усталости материала штампов сопровождается незначительными изменениями гравюры инструмента, что не препятствует получению годных изделий. И лишь после достижения определенных искажений формы рабочей поверхности, которые трансформируются в недопустимые изменения соответствующих размеров поковки, эксплуатация инструмента прекращается. Для прогнозирования наработки на отказ штамповой оснастки необходимо знание интенсивности накопления повреждений в материале рабочего слоя инструмента, а также характера структурных изменений, происходящих в непосредственной близости от поверхности, разрушение которой протекает с образованием питтингов.

Объект и методики исследований. Объектом исследований являлась быстрорежущая сталь Р6М5, которая достаточно часто используется для изготовления сложнопрофильного тяжело нагруженного инструмента холодной высадки, выдавливания и чеканки [4]. Интенсивность накопления усталостных по-

вреждений в поверхностном слое инструмента при многократном контактном воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [5]. Установка обеспечивает контактное нагружение торцевой поверхности плоской части образца 1 за счет его взаимодействия с рабочей поверхностью дискового контртела 2 (рис. 1).

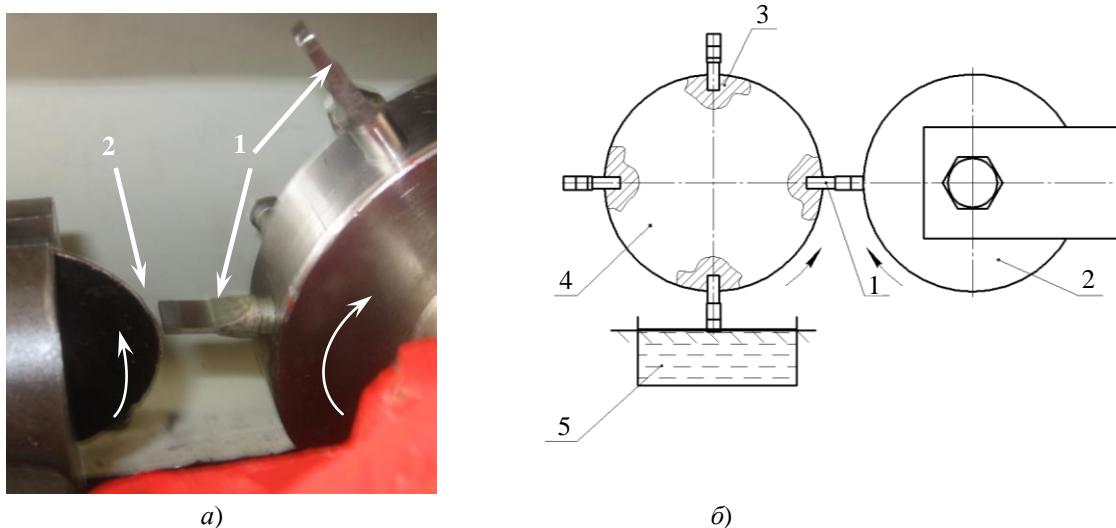


Рис. 1. Взаимодействие образца 1 и дискового контртела 2 в процессе проведения испытания на контактную усталость: 3 – ячейка для закрепления образцов; 4 – план-шайба; 5 – емкость со смазкой

С целью моделирования контактного взаимодействия при трении без проскальзывания контртело в виде диска 2 крепится на шарикоподшипнике в державке штока, а образец с плоской рабочей поверхностью – в ячейке план-шайбы 3, закрепленной на валу редуктора. Перемещение образца по круговой траектории при встрече с подпружиненным штоком, на котором закреплен диск контртела, вызывает его проворачивание, исключая проскальзывание на контактных поверхностях. Для полного воссоздания условий работы штампового инструмента рабочая часть образца окунается в емкость 5 со смазочным материалом, расположенную непосредственно под планшайбой 4, и лишь после этого входит в контакт с диском контртела.

Ширина пластины рабочей части образца превышает толщину рабочей части диска, что позволяет измерять глубину образующейся лунки в процессе испытания образца. Глубина образующейся лунки на торцевой поверхности образца отражает степень усталостного повреждения материала.

На основании результатов испытаний строятся кривые, отражающие зависимость глубины образующейся лунки от числа рабочих циклов при заданной контактной нагрузке. Одновременная установка нескольких образцов в план-шайбу позволяет проводить сравнительную оценку контактной выносливости образцов в зависимости от изменения режимов термической обработки материала или для различных материалов в одинаковых эксплуатационных условиях. Возможность обработки боковых поверхностей плоской рабочей части образца с жестким базированием и применением современного оборудования для подготовки микрошлифов позволяет осуществлять мониторинг накопления усталостных повреждений и изменения структуры по сечению рабочей части образца с применением оптического микроскопа.

Нагрузка на контактную поверхность образца осуществляется за счет изменения жесткости пружины, удерживающей шток, в котором закреплен диск контртела. Подпружиненный шток размещен внутри корпуса с подвижным стаканом. Его перемещение позволяет регулировать жесткость пружины за счет изменения расстояния между опорными поверхностями и создавать необходимое усилие на штоке. Круговое движение образцов в плоскости диска контртела в момент соприкосновения рабочей части образца с контактной поверхностью диска вызывает смещение диска вместе с державкой и подпружиненным штоком. Усилие, необходимое для отеснения диска контртела при продвижении образца, регулируется величиной её предварительного сжатия внутри цилиндра за счет ввинчивания стакана в корпус. Давление на пятне контакта между образцом и поверхностью диска контртела рассчитывается в соответствии с реальной площадью контакта, которая определяется толщиной рабочей поверхности диска контртела (ширина пятна контакта) и толщиной рабочей части образца (высота пятна контакта).

Результаты исследования и их обсуждение. Для устранения негативного влияния остаточного аустенита на износ материала экспериментальные образцы подвергали криогенной обработке, проводя её на различных стадиях технологического процесса (таблица).

Режимы термической обработки экспериментальных образцов из стали Р6М5

Номер партии образцов	Температура закали, °С	Температура отпуска, °С			Стадия применения криогенной обработки	Твердость, HRC
		I отпуск	II отпуск	III отпуск		
1	1200	200	–	–	непосредственно после закали	63...64
2		560	–	–		64...65
3		560	560	–		64...65
4		560	560	560		64,5...65,5
5	1200	560	200	–	после первого отпуска	65...66
6		560	560	560	после второго отпуска	64,5...65,5

Как видно из таблицы 1, термическая обработка образцов 1...4 партий была направлена на полное устранение остаточного аустенита в структуре металла непосредственно после закали. Таким образом достигалась максимальная степень легирования мартенсита. Отпуск образцов первой партии, проведенный при температуре 200 °С, обеспечивал снижение внутренних напряжений, но не создавал условий выделения вторичных карбидов из мартенситной матрицы. Образцы партий 2...4 были подвергнуты высокому отпуску, который проводился после закали и криогенной обработки. В этом случае при проведении отпуска создавались условия для выделения вторичных карбидных частиц из металлической матрицы – мартенсита. Однако из-за отсутствия в структуре металла остаточного аустенита при дисперсионном твердении можно предположить, что процесс выделения вторичных карбидов носил менее интенсивный характер по сравнению с технологией термической обработки, включающей многократный отпуск при температуре 560 °С, проводимый непосредственно после закали без криогенной обработки.

Механизм дисперсионного твердения, основанный на превращении остаточного аустенита в мартенсит с выделением из него большого количества мелкодисперсных вторичных карбидных частиц в процессе проведения отпуска при температуре 560 °С, был задействован при термической обработке образцов партий 5 и 6. Окончательная стабилизация структуры путем криогенной обработки проводилась после однократного и двукратного отпусков соответственно. Очевидно, что в этом случае фазовый состав карбидных включений отражал традиционно получаемую морфологию стали Р6М5, что в наибольшей степени присуще образцам партии 6. Цель криогенной обработки в двух последних случаях сводилась к устранению остаточного аустенита, доля которого по некоторым данным даже после трех отпусков при температуре 560 °С может достигать до 2 % [7].

На основании результатов испытаний образцов из быстрорежущей стали Р6М5 получено семейство кривых, отражающих поведение материала при воздействии на него контактной нагрузки величиной 1280 МПа (рис. 2).

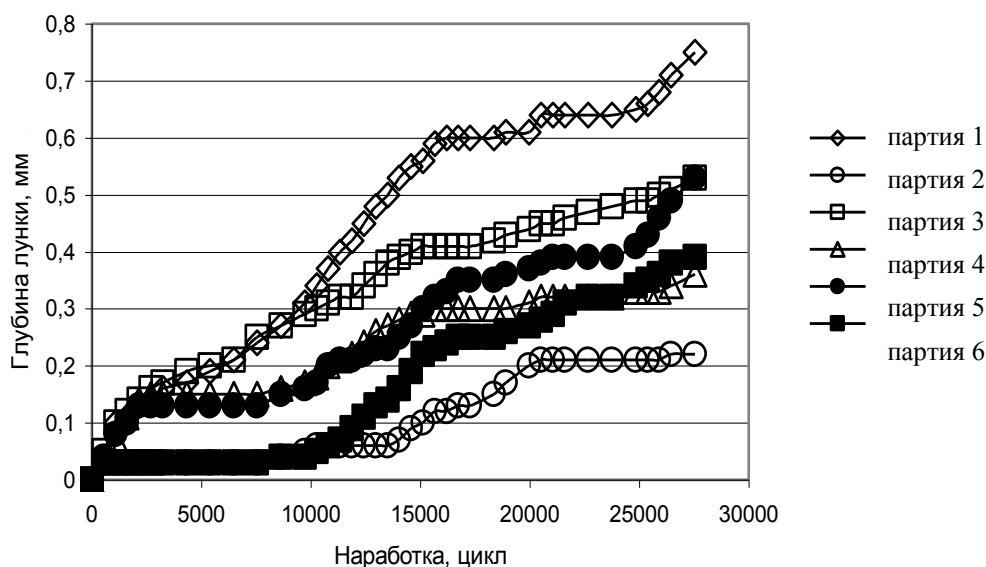


Рис. 2. Кривые, отражающие характер повреждения образцов в процессе контактного нагружения

Как видно из рисунка 2, контактная усталость образцов 1...6 партий существенно отличается, что обусловлено различием режимов термической обработки материала. Наивысшую контактную выносливость продемонстрировали образцы, в которых процесс криогенной гомогенизации проводился непосредственно после закалки, а затем осуществлялся один отпуск при температуре дисперсионного твердения металла (партия 2). Они существенно превосходят образцы, претерпевшие закалку и гомогенизацию по аналогичной схеме, но отпущенные при температуре 200 °С (партия 1). Из графиков видно, что образцы данной партии обладают наименьшим показателем контактной выносливости. В диапазоне между кривыми, отражающими процесс контактного износа образцов партии 1 (верхняя кривая) и партии 2 (нижняя кривая), представлены данные контактной выносливости для случаев применения двух, а также трех высокотемпературных отпусков (560 °С) после закалки и криогенной гомогенизации (кривые 3 и 4). Графики 5 и 6 отражают результаты испытаний при термической обработке, в которых один или два высокотемпературных отпуска проводили сразу после закалки с целью выделения наибольшего количества вторичных карбидов.

Анализ представленных кривых позволяет сделать вывод о том, что лучшей контактной выносливостью обладают образцы из быстрорежущей стали, в структуре которых присутствует максимальное количество легированного мартенсита. Именно такая структура в соответствии с [8] сформирована в образцах второй партии. Образцы 3 и 4 партий обработаны по близким технологическим схемам.

Проведение дополнительных высокотемпературных отпусков приводит к коагуляции карбидной фазы за счет выделения вторичных карбидных частиц из мартенсита и уменьшает его тетрагональность [9]. В итоге снижается твердость, а соответственно, жесткость мартенсита как матричного материала, окружающего карбидные включения. Это в свою очередь вносит расогласования в реакции компонентов композиционного материала на внешнюю нагрузку и, как следствие, создает более благоприятные условия для зарождения трещин, вызывающих появление питтингов. Форма кривых отражает процесс накопления усталостных повреждений и показывает, что в процессе работы всех образцов чередуются две стадии структурных изменений в материале. После начальной стадии приработки износ практически всех образцов стабилизировался, что на графиках отражается пологим участком. В этот момент материал образцов, несмотря на свою высокую твердость, равную 63...66 HRC, претерпевает наклеп.

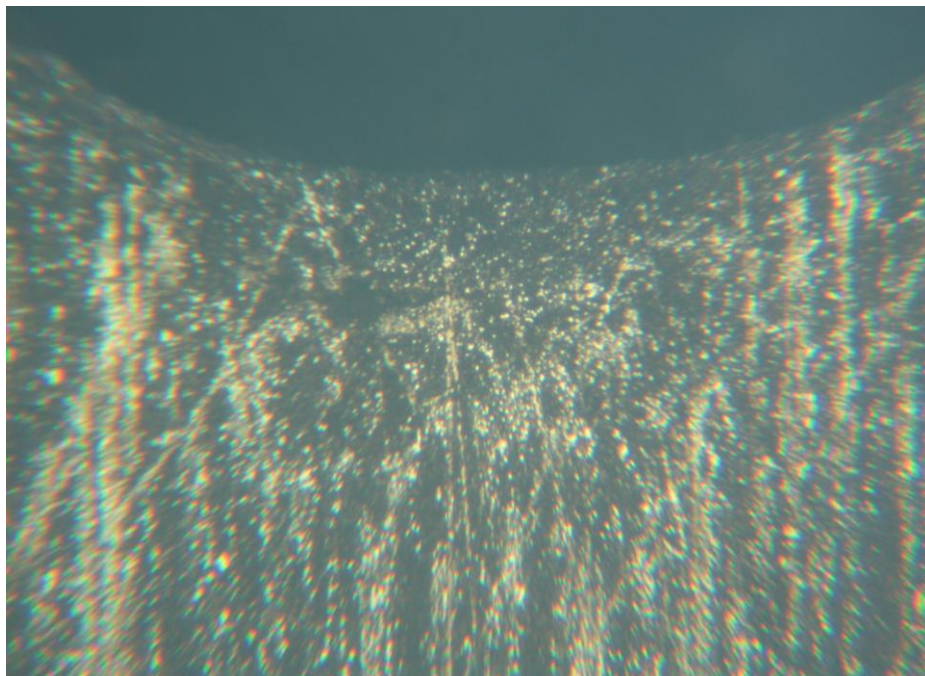


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя стали P6M5, формирующаяся в процессе наклепа в результате контактной усталости ($\times 100$)

Как видно из рисунка 3, небольшой объем металла, располагающийся в непосредственной окрестности дна формирующейся лунки (толщиной до 200 мкм), в результате пластической деформации изменяет свою структуру. Строчечность в расположении карбидных частиц, унаследованная от первоначаль-

ной текстуры заготовки, исчезает. Распределение карбидной фазы становится более равномерным. Микротвердость наклепанного слоя всех партий образцов практически не изменяется (рис. 4).

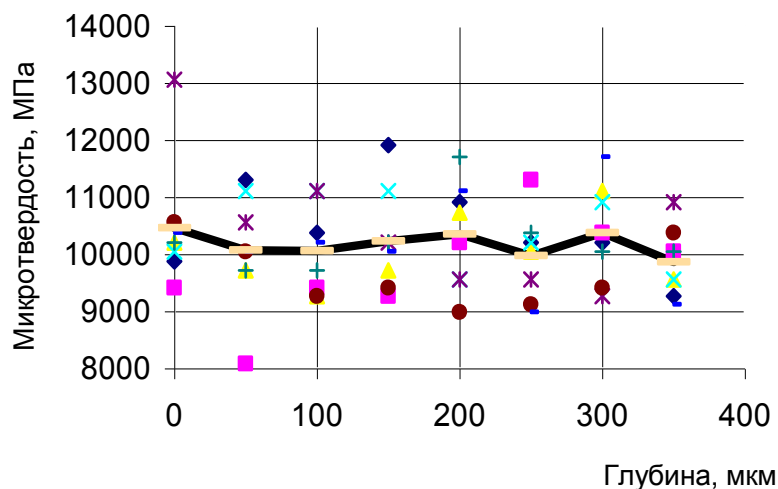


Рис. 4. Распределение микротвердости H_{200} по сечению поверхностного слоя металла в области дна образовавшейся лунки

На определенной стадии в результате предельного накопления дефектов в области дна лунки возникают подповерхностные трещины, формирующие питтинги (рис. 5).

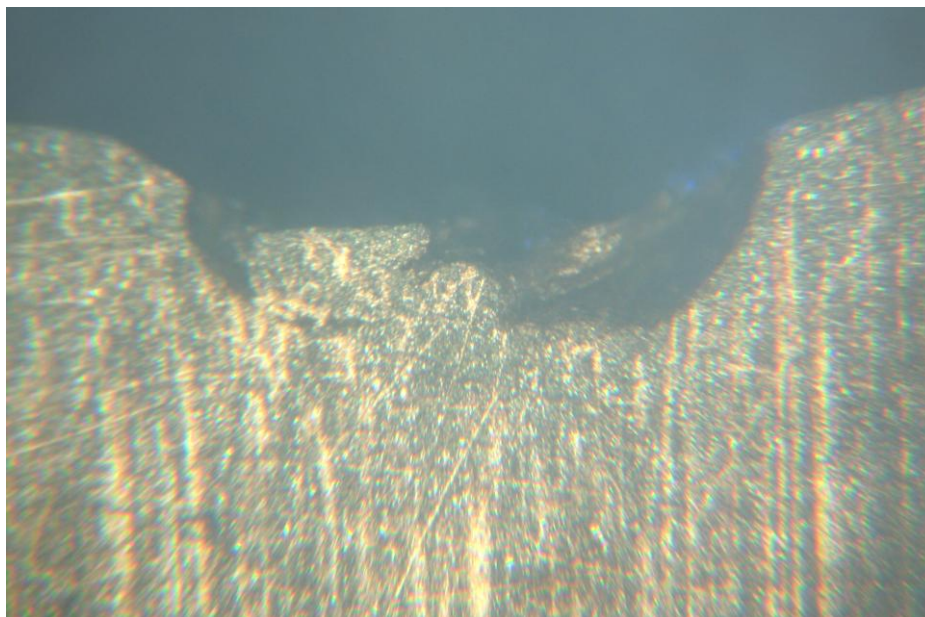


Рис. 5. Образование питтинга в поверхностном слое стали Р6М5, претерпевшем наклеп ($\times 100$)

Этот этап на кривых (см. рис. 2) характеризуется увеличением интенсивности изнашивания и формирования питтинга. Отслоение упрочненных фрагментов металла освобождает для взаимодействия с поверхностью контртела новые более глубокие слои материала образца. В них в свою очередь начинают протекать процессы наклепа, которые завершаются образованием новых питтингов. Такой дискретный механизм формирования лунки на кривых отражается в виде ступенчатого изменения регистрируемого значения прироста глубины лунки. При глубине лунки свыше 0,6 мм возникают достаточно глубокие трещины, которые зарождаются в боковой области дна лунки (рис. 6, а). В этот момент глубина лунки начинает приближаться к ширине её дна. Увеличивающаяся протяженность боковых сторон лунки способствует изменению напряженно-деформированного состояния отдельных объемов материала образ-

ца. В этих условиях накопление внутрикристаллических дефектов приводит к образованию трещин, которые распространяются в наиболее удобном с точки зрения взаимодействия структурных компонентов направлении – вдоль карбидных строчек. Достигнув основания рабочей части образца – нижней части лопатки, направление распространения трещины изменяется и она отделяет рабочую часть образца от державки (рис. 6, б).

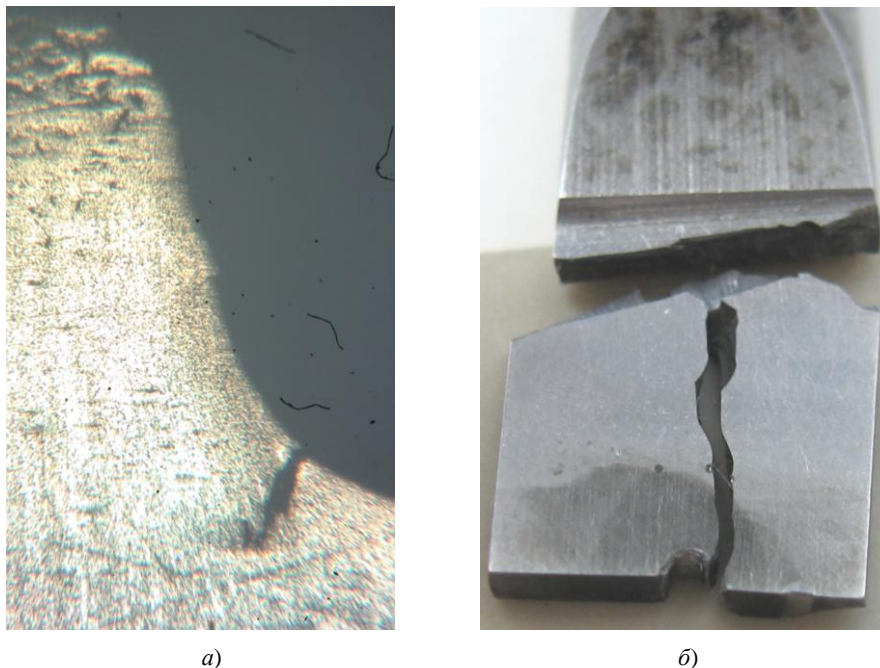


Рис. 6. Трещины (а), возникающие в области дна лунки контактной усталости предельной глубины, и характер разрушения образца (б) в результате их развития

Заключение. В результате проведенного исследования изучены закономерности возникновения повреждений на образцах из стали Р6М5 при их испытаниях на контактную выносливость. Показано, что механизм накопления структурных повреждений включает две стадии. На первой протекает наклеп материала, который сопровождается изменением текстурного рисунка стали Р6М5, унаследованного от структуры заготовки. Структура металла, претерпевшего наклеп, характеризуется равномерным распределением карбидной фазы в матрице, а строчечное распределение карбидных частиц в поверхностном слое практически отсутствует. Структурообразование наклепанного слоя не сопровождается изменением микротвердости металла, которая сохраняет свою величину на уровне 10 ГПа. Это позволяет сделать вывод о том, что структурные изменения поверхностного слоя, протекающие за счет перераспределения карбидных частиц в металлической матрице – мартенсите, не сопровождаются динамическим старением с дисперсионным твердением. То есть морфология α -фазы, сформированная предшествующей термической обработкой, имеет оптимальную дефектность кристаллической решетки, что обуславливает её стабильную твердость.

Контактное нагружение поверхностного слоя, сопровождающееся увеличением степени наклепа, обеспечивает генерацию дополнительных внутрикристаллических дефектов в материале металлической матрицы поверхностного слоя. Этот процесс характеризуется скачкообразным изменением несущей способности материала. Постепенное накопление внутрикристаллических дефектов активизирует рост микротрещин и их слияние, в результате чего стадия наклепа переходит в стадию зарождения питтингов.

Удаление отделившихся фрагментов из зоны контактного взаимодействия обновляет рабочую поверхность, в результате внутренние слои металла вступают в контакт с контртелом. При этом повторяются структурные изменения, запускающие новый цикл процесса «упрочнение – питтингообразование». На графиках регистрации глубины лунки указанная цикличность характеризуется дискретным увеличением интенсивности отслоения фрагментов металла после периода его стабильной работы с незначительным формоизменением.

Кинетика процесса контактного изнашивания поверхности образцов стали Р6М5 зависит от режимов термической обработки материала. Наиболее высокую способность сопротивления развитию контактной усталости показывают образцы, структура которых отличается высоколегированным мартенситом с карбидными частицами. Технологический режим формирования указанной структуры требует про-

ведения криогенной гомогенизации структуры металлической матрицы сплава с целью полного превращения остаточного аустенита в мартенсит непосредственно после проведения закалки. В случаях когда криогенная модификация осуществляется после одно- или двукратной процедуры дисперсионного твердения сплава, показатели контактной выносливости материала несколько ниже, так как при этом снижается степень легирования α -фазы. Процесс питтингообразования сопровождается образованием более глубоких подповерхностных трещин, что может объясняться наличием повышенных внутрикристаллических искажений, явившихся следствием выделения вторичных карбидных частиц из металлической матрицы.

Таким образом, наивысшей сопротивляемостью контактной усталости обладает сплав, с высокой степенью завершения структурообразования в процессе термической обработки и мартенситной матрицей, не склонной к динамическому старению, в которой распределены избыточные карбидные частицы, о чем свидетельствует анализ результатов исследований быстрорежущей стали Р6М5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск: Высш. шк., 1999. – 374 с.
2. Виноградов, В.Н. Механическое изнашивание сталей и сплавов / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин. – М.: Недра, 1996. – 364 с.
3. Кенько, В.М. Влияние микроструктуры штамповой холодновысадочной оснастки на её износостойкость / В.М. Кенько, И.Н. Степанкин // Трение и износ. – 2000. – Т. 21. – С. 323 – 328.
4. Кенько, В.М. Комплексный учет факторов, определяющих стойкость холодновысадочной оснастки / В.М. Кенько, И.Н. Степанкин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 2. – С. 39 – 42.
5. Устройство испытания материалов на контактную усталость и износ: пат. Респ. Беларусь на полезную модель № 7093 / И.Н. Степанкин, В.М. Кенько, И.А. Панкратов; заявка № u201000717 от 16.08.2010, МПК (2009) G 01N 3/00; заявитель УО «ГГТУ им. П.О. Сухого».
6. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
7. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 543 с.
8. Гуляев, А.П. Теория быстрорежущей стали / А.П. Гуляев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1998. – № 11. – С. 27 – 32.

Поступила 05.01.2012

ON THE STUDY OF THE CONTACT ENDURANCE OF STEEL W6Mo5

I. STEPANKIN, V. KENKO, E. POZDNYAKOV, A. KAMKO

The results of the study contact endurance of steel W6Mo5. It is shown that the destruction of the surface layer takes place by alternating two steps. At the first stage of hardening of the material flows, and the second the formation of surface defects in work-hardened layer depth. The metal structure subjected to strain hardness is characterized by equal distribution of carbide phase in matrix. Kinetics of the process of specimen surface contact tearing made of steel W6Mo5 depend on the modes the material heat treatments. The highest ability to resist the development of contact fatigue is shown by specimen, structure of which differs in heavy-alloyed bulky martensite with carbide particles. The uppermost resistance to contact fatigue was determined in alloys with high degree structure formation accomplishment in the course of heat treatment and martensitic matrix, not apt to dynamic ageing, wherein superfluous carbide particles are distributed.

УДК 631.31.02:669.14.018

ОБЪЁМНЫЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗНОСОСТОЙКИЕ ДЕТАЛИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

*канд. техн. наук, доц. Г.Ф. БЕТЕНЯ, канд. техн. наук, доц. Г.И. АНИСКОВИЧ,
канд. техн. наук, доц. А.А. АНДРУШЕВИЧ, П.А. ДЕКЕВИЧ, Д.П. ЛИТОВЧИК
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск);
Л.А. МАРИНИЧ*

*(Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Минск);
д-р техн. наук, проф. Е.Е. ПЕТЮШИК, канд. техн. наук Л.В. МАРКОВА,
канд. техн. наук И.В. ФОМИХИНА
(Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск)*

Рассматривается микроструктурное строение упрочненных деталей рабочих органов из углеродистых сталей пониженной прокаливаемости. Фрагментация микроструктуры углеродистых конструкционных сталей является не только предметом исследований, но становится реальной технологической операцией термической обработки стальных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин. Установлено, что применение импульсного закалочного охлаждения и низкого отпуска обеспечивает получение стальных изделий с объёмной нанокристаллической структурой. В объёмных деталях рабочих органов из углеродистых сталей ПП при их импульсном закалочном охлаждении и низком отпуске формируется фрагментированная нанокристаллическая структура мартенсита, что позволяет достигнуть оптимального соотношения прочностных и вязкостных характеристик, с максимальным обеспечением требуемых технико-экономических показателей. Наличие наноразмерных продуктов и их параметры в деталях определены методами световой и электронной микроскопии.

Введение. Традиционно применяемые материалы и технологии упрочнения деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин достигли своего предела в получении требуемой конструкционной прочности и износостойкости и требуют эффективной замены. Основная причина состоит в том, что с увеличением прочности (твёрдости) и износостойкости пластичность сталей уменьшается [1; 2]. Наличие абразивной среды, значительных ударных нагрузок, высоких напряжений и ряд других причин обусловили необходимость поиска новых подходов для повышения свойств конструкционных сталей в результате формирования в них объёмного микро- и наноструктурированного состояния [2 – 4]. На современном этапе развития металловедения из уже получивших практическую реализацию на наномасштабном уровне явлений можно выделить два основных направления:

- 1) упрочнение стали путём контролируемого введения ультра- и мелкодисперсных наночастиц [1; 2; 5];
- 2) упрочнение за счёт фрагментации – специального управляемого измельчения структуры стали [6 – 8].

Установлено, что наряду с интенсивной пластической деформацией эффективное формирование мелкодисперсных структур может быть достигнуто и при закалке конструкционных сталей за счёт фазового превращения в процессе охлаждения [3]. Практические результаты достигнуты европейскими, американскими и японскими производителями. В работе [7] сообщается о получении в промышленных условиях стальных заготовок толщиной более 200 мм с размером структурных элементов не более 40 нм.

В случае углеродистых конструкционных сталей, в частности сталей пониженной прокаливаемости (ПП), отличающихся относительной дешевизной и недефицитностью, возможен вариант термической обработки на получение мартенситной структуры с повышением их прочностных характеристик на 25...30 % без снижения ударной вязкости [9].

Цель настоящей работы – сведения о возможностях формирования объёмной нанокристаллической структуры в углеродистых сталях пониженной прокаливаемости при реализации импульсного закалочного охлаждения жидкостью (ИЗОЖ) рабочих органов с последующим низким отпуском, а также получаемых механических свойствах.

Основная часть. Термическая обработка деталей рабочих органов из углеродистой стали 60ПП выполнялась на экспериментальной закалочной установке с различной интенсивностью охлаждения. Детали нагревались до температуры закалки с точностью ± 5 °С, время аустенизации составляло 10 мин. Охлаждение осуществлялось потоком воды при различных значениях давления и расхода; температура воды 5...35 °С; время охлаждения 0,5...5 с, в зависимости от толщины изделия.

Исследование микроструктуры упрочненных поверхностей деталей после закалки и низкого отпуска проводилось на образцах в двух плоскостях по схеме, представленной на рисунке 1. Образцы вырезались из деталей рабочих органов (лемехов, дисков и др.) почвообрабатывающих машин после различных режимов термической обработки. Микроструктура упрочненного слоя и сердцевины изучалась на световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении $\times 500$. Микроструктура

упрочненных слоев дополнительно исследовалась на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) при увеличении $\times 5000$, $\times 20000$, $\times 50000$, $\times 80000$ и с использованием детектора *Nordlys II EBSD (Oxford Instruments)* обратно рассеянных электронов. Характеристика и балл мартенсита определялись по ГОСТ 8233, размеры фрагментов мартенсита с использованием метода секущих (метод подсчета пересечений границ зерен по ГОСТ 5639). Фазовый состав, количество остаточного аустенита определялось на дифрактометре общего назначения ДРОН-3.0 в CuK_α -монохроматизированном излучении, вторичная монохроматизация осуществлялась пиролитическим графитом с вращением образца в собственной плоскости. Количество остаточного аустенита и мартенсита рассчитывались с помощью программы автоматизированного рентгеновского исследования «WinDif», по отношению интенсивностей линий всех фаз, присутствующих в образце. Твердость по Роквеллу определялась на твердомере ТК14-250 по ГОСТ 9013. Испытания на трехточечный изгиб проводили на универсальной испытательной машине «Инстрон 1195» в соответствии ГОСТ 473.8.

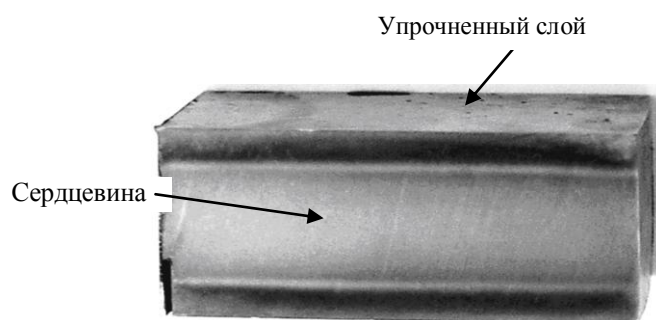


Рис. 1. Схема расположения исследуемых поверхностей образца стали 60ПП

Сталь 60ПП в исходном состоянии (в состоянии поставки после отжига) имеет феррито-перлитную структуру, что не обеспечивает требуемых механических и эксплуатационных свойств. Термическое упрочнение изготавливаемых деталей рабочих органов осуществляли путём закалки с последующим низким отпуском для получения структуры мартенсита отпуска повышенной твердости (60...62 HRC). Применяемые температурно-временные режимы классической закалки приводят к высокой хрупкости стальных изделий, снижая их ресурс [9]. Использование интенсивного импульсного водяного охлаждения при термообработке стали 60ПП позволяет избежать этого недостатка в результате получения объемной нанокристаллической структуры и фрагментации зерен мартенсита.

На рисунке 2, а, б показана микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП при увеличениях $\times 5000$, $\times 20000$. Максимальная длина игл мартенсита – 5...6 мкм, толщина игл – порядка 0,2...0,3 мкм. Структура образца характерна для мартенсита пакетного (реечного) типа со средним поперечным размером реек 450...550 нм.

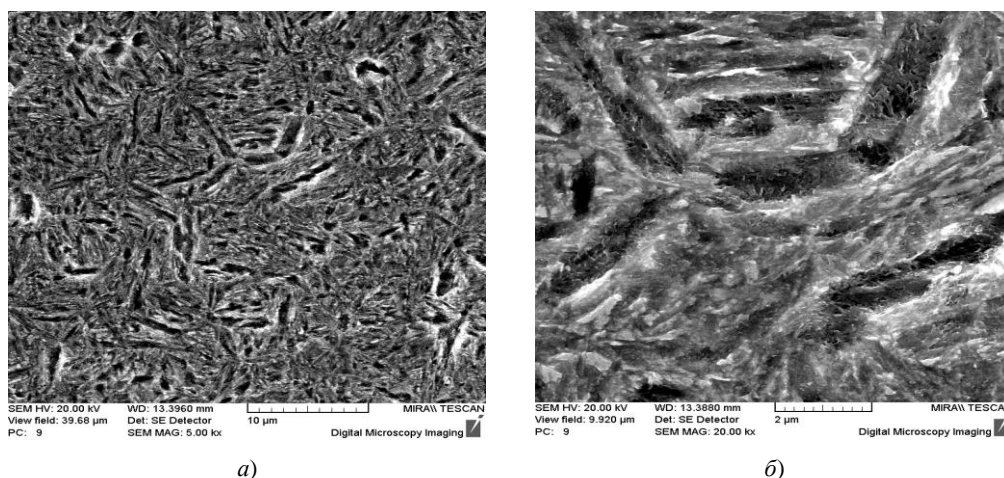
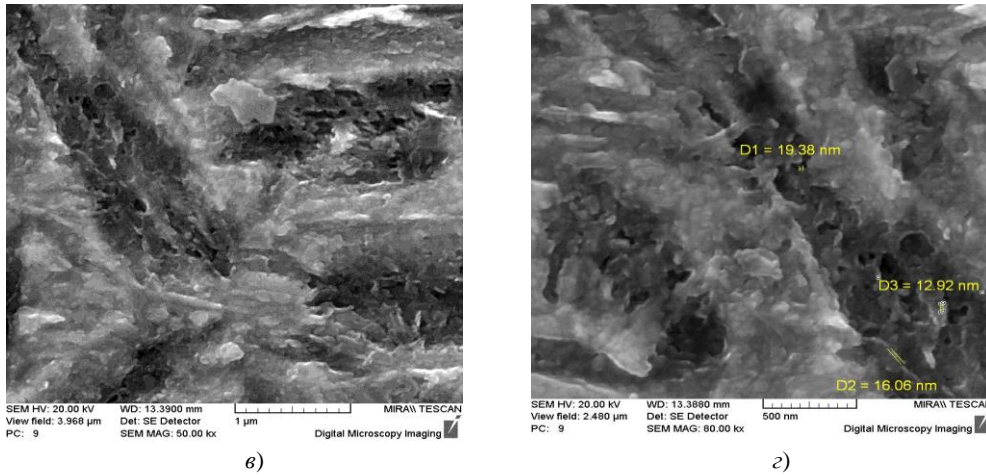


Рис. 2. Микроструктура упрочненного слоя образца стали 60ПП толщиной 8 мм после импульсного закалочного охлаждения водой и низкого отпуска (см. также с. 48): а – увеличение $\times 5000$; б – $\times 20000$

Твердость по Роквеллу упрочненного слоя составляет 56...57 HRC. Только при увеличениях $\times 50\,000$ и $\times 80\,000$ методом электронной микроскопии выявлена фрагментация мартенсита (рис. 2, в, з).



в)

з)

Рис. 2. Окончание:

в – увеличение $\times 50\,000$; з – $\times 80\,000$

В результате исследований определено, что мартенситные иглы частично фрагментированы, размер фрагментов находится в диапазоне 20...150 нм, их средний размер составляет 40...50 нм.

На отдельных фрагментах проявляются очертания субмикрочерен. Края мартенситных пластин и фрагментов частично размыты, что говорит об их аморфно-кристаллическом состоянии.

Статистические данные по средней длине фрагментов мартенситных пластин стали 60ПП после упрочнения рабочей поверхности деталей толщиной 6...12 мм показали, что размер 80 % фрагментов находится в диапазоне 0,02...0,08 мкм (табл. 1, рис. 3); после низкого отпуска при 180 °С размер фрагментов изменяется незначительно, 60 % составляют фрагменты зерен мартенсита размерами 0,02...0,06 мкм.

Таблица 1

Разбиение на классы по длине фрагментов в мартенситных пластинах детали из стали 60ПП после низкого отпуска

Класс	Количество, шт.	Интервал, мкм	Доля по количеству, %	Доля по массе, %
1	0	0...0,02	0	0
2	2	0,02...0,04	3,08	1,14
3	29	0,04...0,06	44,62	30,08
4	26	0,06...0,08	40	45,04
5	7	0,08...0,1	10,77	20,88
6	1	0,1...0,12	1,54	2,85
7	0	0,12...0,14	0	0
8	0	0,14...0,16	0	0
9	0	0,16...0,18	0	0
10	0	0,18...0,2	0	0

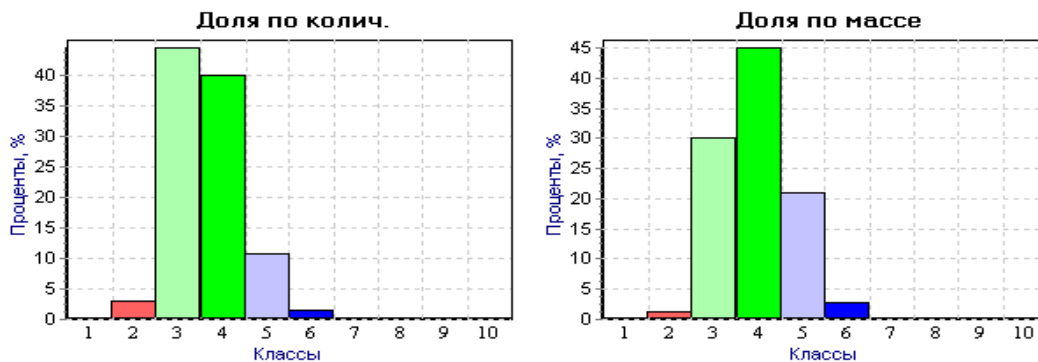


Рис. 3. Гистограммы распределения фрагментов мартенсита по длине в рабочей части детали из стали 60ПП после низкого отпуска: а – доля по количеству; б – доля по массе

Результаты рентгеноструктурных исследований и расчетов параметров тонкой структуры образца толщиной 6 мм в упрочненном слое только после закалки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Расчетные параметры тонкой структуры в упрочненном слое стали 60ПП

Параметр тонкой структуры	Упрочненный слой
Ширина функции физического уширения	1,9211
Средняя относительная деформация, $\times 10^{-3}$	1,403
Плотность дислокаций, см^{-2} , $\times 10^{11}$	0,128
Размер области когерентного рассеяния, Å	101 \pm 3
Параметр ячейки Å	2,8651

Из таблицы 2 видно, что в упрочненном слое размер области когерентного рассеяния уменьшается в 1,1 раза – от 116 до 101 Å, что подтверждается уширением линии на рентгенограмме. В 1,3 раза увеличивается величина средней относительной деформации от $1,095 \cdot 10^{-3}$ до $1,403 \cdot 10^{-3}$. Плотность дислокаций увеличивается в 1,6 раза от $0,780 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $0,128 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ относительно упрочненного слоя образца толщиной 12 мм. Распределение относительной среднеквадратической микродеформации – ОСМД $\langle E^2(L_n) \rangle^{1/2}$ – степенное, характеризующееся скоплением дислокаций. Расчет количества остаточного аустенита в программе PdfWin показал, что он составляет 6...10 %.

Результаты исследований упрочненного слоя образцов стали 60ПП с углубленным изучением микроструктуры мартенсита при больших увеличениях, выявили предпосылки для определения влияния фрагментации игл мартенсита на её механические свойства (табл. 3). Несущественное изменение значений структурно нечувствительного свойства (твердости) для различных режимов термического упрочнения в полной мере не отражают эту зависимость.

Таблица 3

Структурные характеристики углеродистой конструкционной стали 60ПП при различных режимах термической обработки

Толщина образца, мм	Режим термической обработки	Структурные параметры мартенсита		Аустенит остаточный, %	Твердость, HRC	Характеристика структуры упрочненного слоя
		максимальная длина игл, мкм	средние размеры фрагментов, нм			
8	ИЗОЖ + низкий отпуск	6	40...50	–	57	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 4
8	ИЗОЖ + низкий отпуск	4	10...50	–	56	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 3
8	ИЗОЖ + низкий отпуск	3	40...70	–	54	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 2...3, аморфно-кристаллическое состояние мартенситных пластин
12	ИЗОЖ + низкий отпуск	4	5...50	–	58	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 4, аморфно-кристаллическое состояние мартенситных пластин
6	ИЗОЖ + низкий отпуск	4	30...60	6...10	60	Мелкоигльчатый мартенсит, балл 4

Результаты испытаний на трехточечный изгиб образцов стали 60ПП после термической обработки приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты испытаний упрочненной стали 60ПП на трехточечный изгиб

Номер образца	Геометрические размеры сечения образцов		Разрушающая нагрузка, кН	Предел прочности на изгиб, МПа
	толщина, мм	ширина, мм		
04/850/ без отпуска	11,93	7,59	50	3022,5
05/800/ без отпуска	11,92	7,92	50	2796,4
1т/800/ + низкий отпуск	9,75	8,05	50	3803,3
2т/850/ + низкий отпуск	9,46	8,62	50	4433,6

Изучение механических свойств стали 60ПП после закалки (без отпуска и с ним) показали, что наноструктурные изменения приводят к значительному увеличению предела прочности на изгиб в 1,35...1,45 раза.

Для получения более полной информации изучалось строение упрочненных слоев методом дифракции обратно рассеянных электронов. Исследования осуществляли на образце толщиной 12 мм после закалки и низкого отпуска в зоне упрочнения и вне её на сканирующем электронном микроскопе «Mira». Была проведена оценка разориентации фрагментов зерен мартенсита при различных режимах методом обратного рассеивания вторичных электронов. В результате исследований упрочненного слоя и вязкой сердцевины выявлена повышенная концентрация малоугловых границ в крупных зернах. Наибольшее количество фрагментов характеризуются разориентировкой границ меньше 2° .

На рисунке 4 представлены карта и гистограммы ориентации кристаллита с обозначенными границами зерен на участке упрочнения.

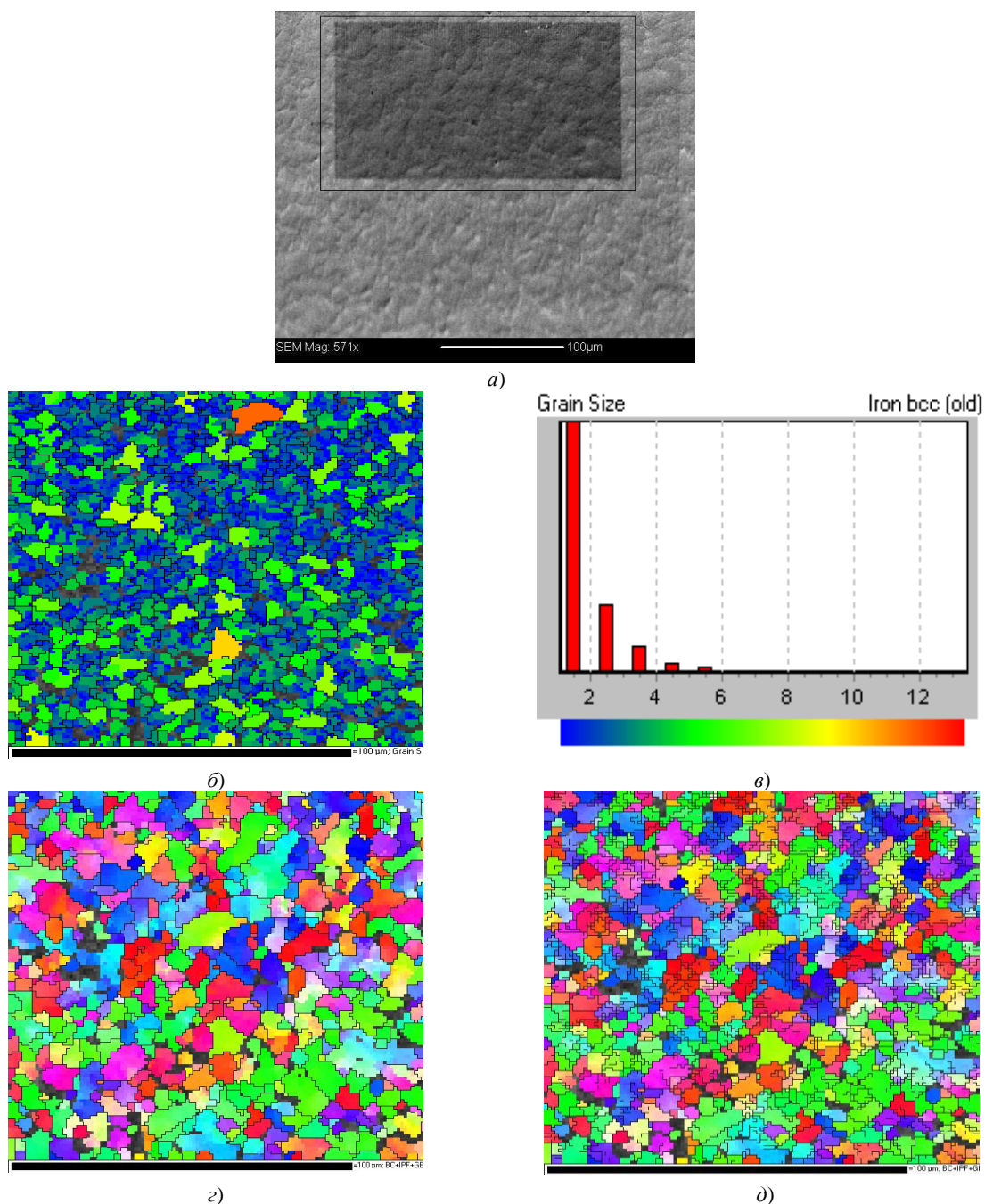


Рис. 4. Строение упрочненного слоя образца стали 60ПП:

a – анализируемый участок; *б* – карта распределения зерен по размерам; *в* – гистограмма распределения зерен по размерам;

г – границы зерен с углами разориентации больше десяти градусов;

д – границы зерен и фрагментов – субзерен с углами разориентации больше двух градусов

Из рисунка видно, что в упрочненном слое зерна разбиты на фрагменты (субзерна) с углами разориентации больше двух градусов. Преобладают зерна размером порядка 0,02...0,08 мкм. Размер субзерен меньше 0,1 мкм. В случае сердцевин разбитие зерен на фрагменты практически отсутствует, преобладают зерна размерами порядка 1...2 мкм.

Выводы:

1. В объёмных деталях рабочих органов из углеродистых сталей ПП при их импульсном закалочном охлаждении и низком отпуске формируется фрагментированная нанокристаллическая структура мартенсита, что позволяет достигнуть оптимального соотношения прочностных и вязкостных характеристик с максимальным обеспечением требуемых технико-экономических показателей.

2. Фрагментация микроструктуры углеродистых конструкционных сталей является не только предметом исследований, но становится реальной технологической операцией термической обработки стальных деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин.

3. В результате выбранных режимов термообработки для стали 60ПП мелкоигльчатый мартенсит с наибольшей длиной игл, равной 1...4 мкм, дробится на отдельные, разориентированные под определёнными углами фасетки размерами 20...80 нм внутри пластинок мартенсита. При этом характеристики её механических свойств (например, предел прочности на изгиб) возрастают на 35...45 %, что существенно превосходит аналогичные показатели при традиционных режимах закалки и отпуска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин, Ю.М. *Материаловедение: учебник для высш. техн. учеб. заведений* / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьев. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
2. *Материаловедение: учеб. для вузов* / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – Изд. 8-е. – М.: Изд-во МГТУ, 2008. – 648 с.
3. Лякишев, Н.П. *Наноматериалы конструкционного назначения* / Н.П. Лякишев, М.И. Алымов // *Российские нанотехнологии*. – 2006. – Т. 1, № 1 – 2. – С. 71 – 81.
4. Рыбин, В.В. *Технологии создания конструкционных наноструктурированных сталей* / В.В. Рыбин, В.А. Малышевский, Е.И. Хлусова // *МИТОМ*. – 2009. – № 6(643). – С. 3 – 7.
5. Ушеренко, С.М. *Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов* / С.М. Ушеренко. – Минск: НИИ ИП с ОП, 1998. – 210 с.
6. *Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях* / И.В. Горынин [и др.] // *Вопросы материаловедения*. – 2008. – № 2(54). – С. 7 – 19.
7. *Bulk nanocrystalline steel* // *Ironmaking and steelmaking*. – 2005. – V. 32. – P. 405 – 410.
8. Быков, Ю.А. *Структура и свойства конструкционных наноматериалов* / Ю.А. Быков // *Приложение № 7 к журналу «Справочник. Инженерный журнал»*. – 2010. – № 7. – С. 1 – 24.
9. *Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин* / И.Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2010. – 320 с.

Поступила 23.01.2012

VOLUMINOUS NANOCRYSTALLINE WEAR-RESISTING PARTS OF WORKING ELEMENTS OF AGRICULTURAL EQUIPMENT

G. BETENYA, G. ANISKOVIKH, A. ANDRUSHEVICH, P. DEKEVICH, D. LITOVCHIK, L. MARINICH, E. PETIUSHIK, L. MARKOVA, I. FOMIKHINA

The article presents information on the microstructural details of the structure of the hardened working parts from low carbon steel hardenability. Fragmentation of the microstructure of carbonic constructional steels is not only a subject for study, but has become substantive manufacturing operation of heat treatment of steel parts of agricultural machinery working elements. It was found that the use of pulsed cooling and hardening of low holiday provides steel products with a bulk nanocrystalline structure. In voluminous parts of the working elements made of carbon high-strength steel in the course of their impulse hardening cooling and deep drawing fragmented nanocrystalline structure of martensite is formed. Thus, we can reach optimum relationship hardening and viscosity ratings, with maximum provision of the required cost-performance ratio. Defined by the presence of nanoscale products and their parameters in detail by light and electron microscopy.

УДК 631.312

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ И РАЗУПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ

канд. техн. наук, доц. Т.А. АГАБЕЙЛИ, канд. техн. наук, доц. С.Я. САДЫХОВ,
канд. техн. наук Р.Д. АЛЕКПЕРОВ, Р.В. МАМЕДОВ
(Азербайджанский научно-исследовательский институт «Агромеханика», Баку)

Рассмотрены принципиально новые конструкции малогабаритных комбинированных почвообрабатывающих агрегатов, выполняющих технологический процесс противоэрозионной послойной обработки почвы с одновременным разуплотнением следов прохода движителей тракторов, предназначенные непосредственно как для обработки пропашных культур, так и обработки междурядий в садах, виноградниках, орехоплодных и субтропических культур в горно-равнинном земледелии. Они отличаются компактностью, небольшой продольной базой и высокой маневренностью в работе на мелких и средних участках различной конфигурации.

Прогрессивные инновационные технологии в земледелии как результат научно-производственной деятельности ученых позволяют совмещать поверхностную и глубокую обработку почвы, ее щелевание, кротование, мульчирование и другие операции с использованием принципиально новых конструкций рабочих органов. На современном этапе развития инновационных технологий в сельскохозяйственной практике особое внимание уделяется бесплужной почвозащитной и энергосберегающей минимальной обработке почвы, что позволяет совмещать несколько операций в едином технологическом цикле [1 – 3]. Сохранение плодородия почв при сплошной и междурядной обработке под пропашные и многолетние культуры в горно-равнинном земледелии требует наряду с проведением как противоэрозионной защиты от смыва, так и наиболее перспективного щелевого разуплотнения ее следов по ширине прохода движителей тракторов. Это подтверждено исследованиями ученых, которыми были установлены пределы оказываемого фактического давления мобильными агрегатами на почву до 294...490 кПа, при допускаемых значениях 39...49 кПа, а также удельные давления для колесных тракторов – не более 98 кПа, для гусеничных – 39 кПа [1 – 5].

На схеме (рис. 1) приведена конструкция комбинированного почвообрабатывающего агрегата для противоэрозионной почвозащитной обработки горно-предгорных склоновых посадок виноградников и садов.

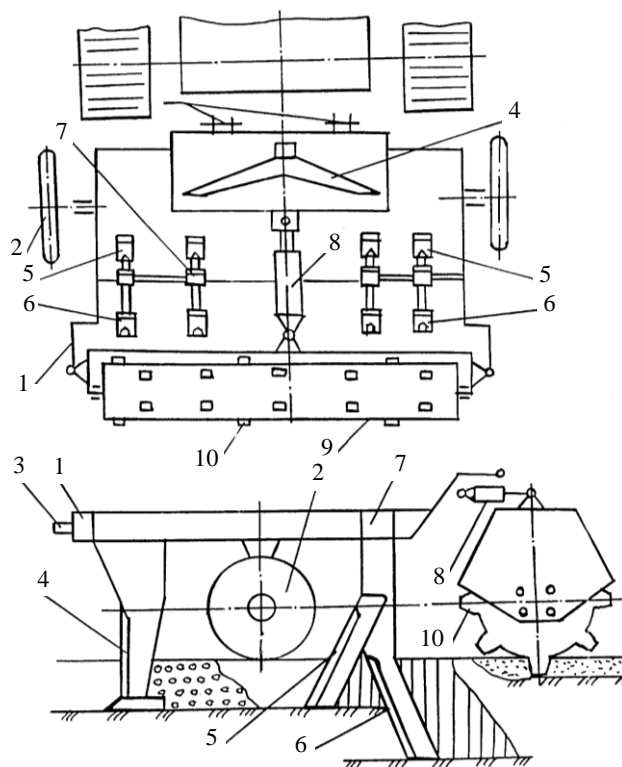


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема малогабаритного плоскореза-щелевателя:
1 – рама; 2 – опорное колесо; 3 – прицеп; 4 – плоскорез; 5, 6, 7 – нож верхнего яруса, нижнего яруса и стойка;
8 – гидроцилиндр; 9 – каток; 10 – зуб катка

Отличительным признаком новой конструкции является компоновка на раме одного широкозахватного плоскореза с охватом ширины колеи, заблокированных двух пар двухъярусных щелевателей с охватом следов прохода гусениц трактора и зубчатого катка.

Конструктивно-технологическая схема устройства обусловлена агротехническими требованиями, предъявляемыми к орудиям противэрозионной обработки почвы, когда середина междурядья в садах и виноградниках должна обрабатываться плоскорезом на небольшую глубину до 16...18 см с обязательным сохранением растительных остатков в верхнем и поверхностном слоях почвы.

Учитывая, что приствольные и прикустовые полосы в садах и виноградниках расположены непосредственно в защитной зоне и в местах прохода гусениц тракторов, прилегающих почвенных слоях залегания корневой системы растений, возникает необходимость обязательного разуплотнения и создания требуемого рыхлого влаго- и воздухопроницающего слоя почвы для накопления и сохранения требуемой влаги, предотвращая при этом эрозионный процесс смыва поверхностного слоя почвы.

Технологический процесс работы комбинированного агрегата (см. рис. 1) в первоначальном рыхлении середины междурядья плоскорезом на глубину 8...12 и 16...18 см пахотного слоя, после чего вслед справа и слева полосы захвата нарезаются две деблокированные щели передними ножами до 18 см верхнего яруса щелереза и на глубину до 32...38 см задними ножами нижнего яруса щелереза. Вслед им осуществляется боронование поверхности почвы по всей ширине захвата дисковым катком с зубьями, которые одновременно с обработкой выравнивают общий поверхностный фон.

Таким образом, применение комбинации рабочих органов плоскореза-щелереза позволяет повысить качество щелевания с разуплотнением следов прохода колес и гусениц тракторов с охватом приствольных и прикустовых полос, создает наиболее благоприятные условия влаго- и воздухопроницаемости в корнеобитаемых слоях растений и предотвращает эрозионный процесс смыва поверхностного слоя почвы.

На рисунке 2 приведена принципиально новая технология деблокированного щелевания почвы с активным рыхлением промежуточной ширины захвата самовращающимися роторными ножами за счет использования в качестве естественного привода сопротивления самой почвы при наличии преобразующейся потенциальной энергии в пульсирующую кинетическую [3].

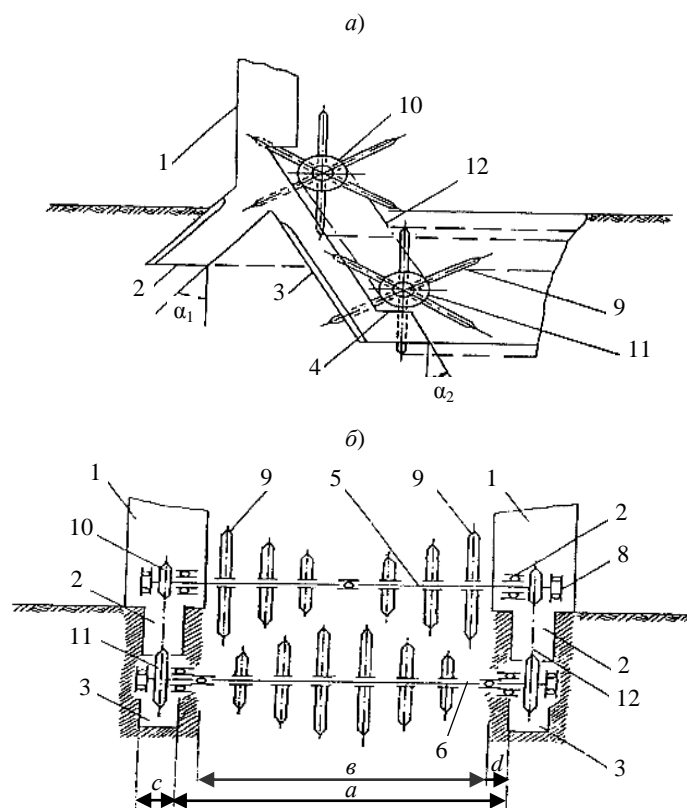


Рис. 2. Двухъярусный щелерез (вид сбоку (а), вид сзади (б)) по патенту РФ № 2223621:

- 1 – стойка; 2, 3 – передний и задний щелерезы; 4 – выступ; 5, 6 – верхняя и нижняя ось вращения; 7 – подшипник; 8 – пята; 9 – нож ротационного рыхлителя; 10, 11 – верхняя и нижняя звездочка; 12 – цепная передача; а – ширина полосы зоны деблокирования; в – ширина следов прохода движителей трактора; с – ширина нарезки щели; α_1 – угол наклона вперед щелереза 2; α_2 – угол наклона назад щелереза 3

Таким образом, проводится операция послойного активного рыхления зоны деблокирования, что позволяет предотвращать водную эрозию за счет сохранения влаги в почве, качественно разуплотнять и разрыхлять ее пахотный слой, создав тем самым наиболее благоприятные условия водно-воздушного режима питания корневой системы растений.

Устройство (см. рис. 2) имеет два заблокированных щелевателя по ширине полос от прохода следов трактора, причем каждый имеет стойку, на которой установлены поярусно и с наклоном в противоположные друг другу стороны относительно направления движения.

Между каждой парой заблокированных щелевателей установлены поярусно ротационные рыхлители, причем оси их смещены относительно друг друга по вертикали и синхронно связаны по осям вращения цепной передачей с отношением 1,5 нижнего к верхнему. На осях рыхлителей смонтированы ножи со смещением по осям, перекрытием по вертикали, расположением в шахматном порядке и диаметрально противоположно в противофазах вращения.

Устройство позволяет обеспечить двухъярусному щелерезу устойчивость хода по глубине за счет частичного уравнивания вертикальных реакций сопротивления (вращения переднего ножа, направленного вниз, и реакции заднего ножа, направленного вверх) и не требует дополнительного механического или гидравлического привода.

Принцип разуплотнения следов прохода движителей трактора с использованием конструкции двухъярусного щелереза использован также в конструкции комбинированного почвообрабатывающего агрегата (рис. 3), дополнительно снабженного секцией спаренных полудисков (а также с возможностью замены их сферическими дисками), расположенных диаметрально противоположно относительно друг друга и в противофазах вращения.

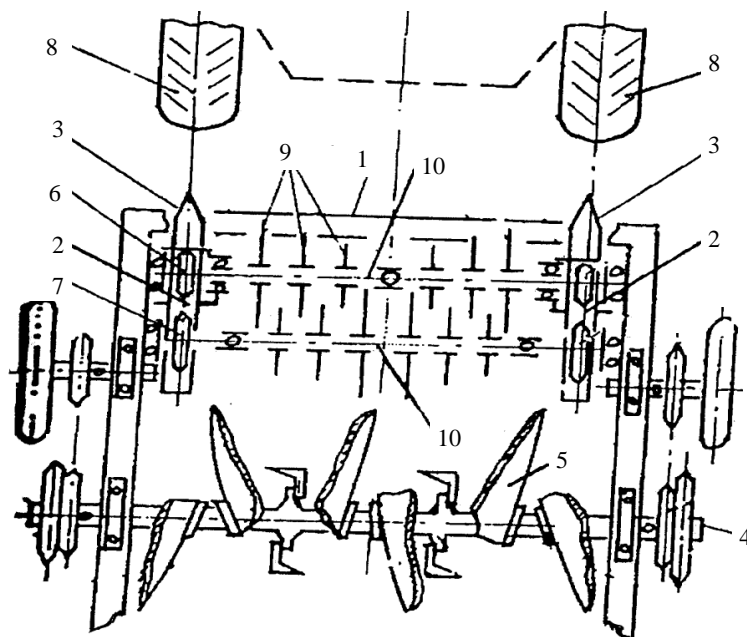


Рис. 3. Комбинированный почвообрабатывающий агрегат:

1 – рама; 2 – цепная передача; 3 – двухъярусные щелерезы; 4 – ось вращения спаренных полудисков 5 с промежуточными секциями фрезерных ножей; 6, 7 – соответственно звездочки верхней и нижней ступени тыловой поверхности нижнего яруса; 8 – колеса трактора; 9, 10 – соответственно рыхлительные ножи и оси вращения верхней и нижней ступени тыльной поверхности нижнего яруса щелереза

Интенсивность активного вращения ножей 9 в верхнем и нижнем слоях почвы обеспечивается за счет разницы сопротивления почвы в них и в силу кинематической связи звездочек 6, 7 цепной передачи 2 с ножами 9, расположенными на осях 10 в шахматном порядке, а также за счет перекрытия ножей 9 верхнего и нижнего яруса, когда в их среднем промежутке вертикального разреза почвы ее сопротивление будет существенно ниже сопротивления на максимальной глубине.

Вместе с тем наличие на раме 1 опорных колес комбинированного агрегата с цепной передачей на заднюю ось 4 вращения спаренных полудисков 5, осуществляющих полувинтовое геликоидальное рыхление на глубине 14...20 см, расположенных в противофазах вращения относительно друг друга и диаметрально противоположно с дополнительными промежуточными секциями фрезерных ножей на глуби-

не до 12 см, обеспечивает смещение почвы дисками под углом атаки назад «от себя», способствуя более интенсивному вращению и выравниванию поверхности с мелкокомковатой структурой почвы.

Таким образом, осуществляется деблокированное щелевание и разуплотнение следов прохода движителей трактора с комбинированной послойной обработкой и выравниванием поверхности почвы.

Деблокированная и послойно-комбинированная обработка следов движителей трактора щелеванием с интенсивным рыхлением рассмотренных конструкций комбинированных почвообрабатывающих орудий позволяет сделать следующие **выводы**:

- обеспечивается уравнивание сил сопротивления почвы в вертикальной плоскости, когда вертикальная реакция тягового сопротивления переднего щелереза направлена вниз на заглубление, а заднего щелереза вверх на выглубление, что обуславливает уравнивание устойчивости глубины хода рабочих органов;

- обеспечивается высокое качество рыхления за счет того, что подпочвенный ротационный рыхлитель стимулирует сосредоточенное уменьшение сопротивления в промежуточном и верхнем слоях почвы;

- не требуется дополнительный механический или гидравлический приводы от вала отбора мощности трактора, так как сама почва выполняет функцию естественного привода;

- предотвращается переуплотнение следов прохода трактора в начальной фазе технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бараев, А.И. Комплекс противоэрозионных орудий и машин, основное направление их совершенствования / А.И. Бараев, А.Н. Важеин // Тр. ВНИИ Зернового хозяйства. Т. V. – М., 1974. – С. 5 – 18.
2. Демшин, С.Л. Расчет оптимальной ширины захвата агрегата для обработки почвы и посева / С.Л. Демшин, Е.А. Владимиров // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. – № 5. – С. 6.
3. Жук, А.Ф. Рыхление почвы долотами и щелерезами / А.Ф. Жук // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 3. – С. 21 – 25.
4. Способ деблокированного щелевания почвы и устройство для его осуществления: пат. РФ № 2223621 / Ф.А. Мамедов, Т.А. Агабейли [и др.]; опубл. // Бюл. изобр. – 2004. – № 5. – С. 5, ил. 3.
5. Почвообрабатывающее орудие: пат. Az № i2006009. Аз. Респ. / Р.М. Мамедов, Т.А. Агабейли [и др.]. – Баку, 2006.

Поступила 24.01.2012

TECHNOLOGY FOR PROCESSING AND DECOMPRESSION SOIL

T. AGABEYLI, S. SADYXOV, R. ALEKPEROV, R. MAMEDOV

The article deals with a fundamentally new design of compact combined tillage units that perform erosion process fiber wise-term tillage with simultaneous decompression traces the passage of tractor propellers, pre-designated themselves as cultivated crops for processing and treatment of spaces between rows in orchards, vineyards, nut and subtropical crops in the mountain-plain agriculture. They differ from-compact, a small longitudinal base and high mobility in the work to small and medium size sites of different configurations.

УДК 621.9.06.014

СКОРОСТНОЕ СИЛОВОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

канд. техн. наук, доц. В.И. ТУРОМША

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Предложенная концепция фрезерования реализует одновременно преимущества силового и скоростного методов обработки резанием с целью достижения наибольшей производительности снятия материала. Исходя из условий максимальной загрузки станка по мощности и полного использования режущего инструмента по стойкости наибольшая производительность достигается при назначении максимально возможной подачи. Повышение производительности за счет увеличения скорости резания достигается применением режущего инструмента более высокого качества. Снятие припуска производится за несколько рабочих ходов инструмента. Повышение мощности привода главного движения станка до такого уровня, при котором параметры сечения срезаемого слоя возрастают до рекомендуемых значений при черновой обработке, позволяет увеличить производительность фрезерования.

Введение. Актуальной задачей в области лезвийной обработки деталей является повышение производительности за счет сокращения машинного времени при удалении больших объемов металла [1]:

- при выборке полостей, карманов и уступов в деталях пресс-форм и штампов;
- при изготовлении деталей сложной формы в условиях единичного и мелкосерийного производства из заготовок простой формы, получаемых прокаткой;
- при обработке заготовок с большим припуском, получаемых свободной ковкой (заготовки вагонных осей) и др. методами.

Для этих целей различными фирмами (в основном зарубежными) предлагаются высокопроизводительные режущие инструменты, а также справочно-методические материалы по назначению параметров режима резания [1]. Изложенные в них методики отличаются от методик, приведенных в отечественной справочной литературе, а именно:

- рекомендуются высокие значения подач, а глубина резания не обязательно принимается максимальной. Она выбирается в соответствии с величиной подачи и может быть меньше припуска, который снимается не за один рабочий ход инструмента, а за несколько;
- снижается период стойкости режущего инструмента (для одного лезвия рекомендуется 15 мин и менее) за счет соответствующего повышения скорости резания.

Для высокопроизводительной обработки деталей металлорежущий станок по силовой и скоростной характеристикам должен соответствовать возможностям режущего инструмента, а сам инструмент – обладать высокими эксплуатационными свойствами, т.е. обеспечивать требуемую допускаемую скорость резания при заданном периоде стойкости [2].

К сожалению, теоретические основы построения высокопроизводительных технологических процессов обработки деталей в справочно-информационных изданиях фирм-производителей режущего инструмента не приводятся. Это создает сложности при использовании дорогостоящего инструмента на отечественном оборудовании, которое по своим техническим параметрам не всегда соответствует требуемому уровню. Поэтому технологи зачастую назначают режим резания не по каталогам производителей инструмента, а по известным справочникам [3]. В результате потенциал инструмента по производительности обработки используется недостаточно. Отсутствие научно обоснованных требований к уровню технических параметров станков и инструментов также не способствует и развитию отечественной станкоинструментальной промышленности в целом.

В связи с этим рассмотрим концепцию высокопроизводительного процесса обработки деталей на примере фрезерования, названного *скоростным силовым фрезерованием*. Особенность концепции в том, что она объединяет достоинства силового метода обработки, т.е. фрезерования с увеличенной подачей, и скоростного, т.е. с увеличенной скоростью резания.

Математическое обоснование концепции скоростного силового фрезерования. Один из ключевых моментов в предложенной концепции – выбор первого (начального) шага при назначении режима резания. Традиционно в отечественной справочной литературе рекомендуется вначале выбрать максимальную глубину резания. Данное положение сформулировано еще в 30-е годы прошлого столетия профессором С.Ф. Глебовым и др. [4; 5], остается неизменным до настоящего времени, хотя неоднократно подвергалось сомнению [6], и составляет основу *второго закона резания*, в соответствии с которым при заданной площади сечения срезаемого слоя следует по возможности увеличивать глубину резания t (мм) за счет подачи S_o (мм/об) (при фрезеровании – S_z (мм/зуб)). Обоснование данного закона выполнено на основе анализа количества теплоты, отводимой от режущего лезвия инструмента, и оценки влияния тем-

пературы резания на период стойкости инструмента. Поэтому для математического доказательства закона используется уравнение стойкости (T) или скорости резания (v , м/мин), допускаемой инструментом [5; 7], которое при точении имеет вид:

$$v = \frac{C_v}{T^m t^{x_v} S_o^{y_v}}, \quad (1)$$

где C_v – постоянный коэффициент; x_v, y_v – показатели степени; m – показатель относительной стойкости.

Производительность (Π) обработки деталей на металлорежущих станках можно оценить объемом снимаемого материала в единицу времени. При точении $\Pi = t \cdot s \cdot v$ (t – глубина резания, мм; s – перемещение режущей кромки резца, мм, в движении подачи за 1 оборот заготовки, численно равно подаче на оборот S_o , мм/об; v – скорость резания, м/мин) [7]. Тогда при $x_v = 0,35$ и $y_v = 0,65$ [5] из формулы (1) получим, что увеличение глубины резания в 2 раза дает снижение скорости резания на 22 % и рост производительности в 1,56 раза. При постоянной глубине резания увеличение подачи в 2 раза приводит к снижению скорости резания на 37 % и росту производительности в 1,26 раза, что меньше, чем в первом случае. Отсюда делается вывод о преимуществе работы с максимальной глубиной резания [5; 7].

Однако анализ данного примера показывает, что для того, чтобы получить увеличение производительности, необходимо выполнение условия $x_v \leq y_v$. В реальности же при обработке многих материалов имеет место соотношение $x_v > y_v$ [6], т.е. приведенное выше доказательство не является полностью корректным. Но главное, что в данном решении отсутствуют силовые и другие характеристики процесса резания, а также технологические возможности станка [6]. В частности, для снятия определенного объема стружки требуется соответствующая мощность главного привода станка, а формула (1) этого не учитывает.

Производительность любой технологической машины зависит в первую очередь от мощности двигателя, приводящего в действие рабочий орган. В металлорежущем станке двигатель привода главного движения выполняет работу, затрачиваемую на снятие материала с заготовки. Объем материала, снятого в единицу времени, т.е. производительность обработки, определяется работой резания, произведенной за единицу времени, т.е. мощностью двигателя привода главного движения. Поэтому обеспечение максимальной загрузки станка по мощности является одним из основных условий повышения производительности обработки деталей. Особенно это актуально для современного высокопроизводительного режущего инструмента, отличающегося высокими эксплуатационными свойствами. Полное использование потенциала режущего инструмента предполагает также работу с заданным периодом стойкости.

Следовательно, для достижения максимальной производительности обработки резанием необходимо обеспечить одновременно полную загрузку станка и полное использование режущего инструмента по стойкости [2; 8]. Поэтому логичным является использование совместно с зависимостью (1) уравнения эффективной мощности резания и представление математической модели в виде системы уравнений, включив в нее в качестве целевой функции производительность обработки Π .

Применительно к операции фрезерования получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m t^{x_v} S_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}}; \\ P_z = \frac{C_p t^{x_p} S_z^{y_p} B^{u_p} z}{D^{q_p} n^{w_p}}; \\ N = \frac{P_z v}{61200}; \\ n = \frac{1000v}{\pi D}; \\ \Pi = \frac{B}{\pi D} \cdot \frac{t S_z z v}{1000} \rightarrow \max, \end{array} \right. \quad (2)$$

где N – эффективная мощность резания; P_z – тангенциальная составляющая силы резания; T – период стойкости фрезы; B – ширина фрезерования; D и z – диаметр и число зубьев фрезы; S_z – подача на зуб; C_v, C_p – постоянные коэффициенты; $x_v, y_v, u_v, p_v, q_v, x_p, y_p, u_p, q_p, w_p$ – показатели степени; m – показатель относительной стойкости; Π – объем снимаемого металла в единицу времени (см³/мин).

При заданных ограничениях N и T решение модели (2) может быть получено путем варьирования с определенным шагом значениями S_z и вычислением t и v . Для каждого шага определяется производительность обработки Π , а затем сочетание параметров режима резания, при котором $\Pi \rightarrow \max$.

Анализ результатов решения модели (2). Пример решения в соответствии с моделью (2) для торцевого фрезерования деталей из конструкционной стали ($\sigma_g = 750$ МПа) приведен в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметров режима резания и производительность снятия материала в соответствии с моделью (2) при торцевом фрезеровании деталей из конструкционной стали фрезой из твердого сплава Т15К6

S_z , мм/зуб	$N = 10$ кВт						$N = 20$ кВт					
	$T = 180$ мин			$T = 90$ мин			$T = 180$ мин			$T = 90$ мин		
	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	Π , см ³ /мин
0,1	1,81	291	134	1,60	338	139	3,83	270	263	3,40	314	271
0,2	1,31	228	151	1,16	265	156	2,77	211	298	2,46	246	307
0,4	0,94	178	172	0,84	207	177	2,01	165	338	1,78	192	348
0,6	0,78	155	184	0,69	180	190	1,66	143	363	1,47	167	374
0,8	0,68	140	194	0,61	162	200	1,45	129	383	1,29	151	394
1,0	0,62	129	202	0,55	150	208	1,31	120	398	1,16	139	410
1,2	0,57	121	209	0,5	141	215	1,20	112	411	1,06	130	424
1,4	0,53	115	215	0,47	133	221	1,12	106	423	0,99	124	436
1,6	0,49	109	220	0,44	127	227	1,05	101	433	0,93	118	446
1,8	0,47	105	225	0,41	122	231	0,99	97	442	0,88	113	456
2,0	0,45	101	229	0,39	117	236	0,95	94	451	0,84	109	465
2,5	0,40	93	238	0,36	109	246	0,85	87	469	0,76	101	484
3,0	0,37	88	246	0,33	102	254	0,78	81	485	0,70	94	500

Материал режущей части фрезы – твердый сплав Т15К6; диаметр фрезы $D = 125$ мм; число зубьев $z = 10$; ширина фрезерования $B = D/1,25 = 100$ мм. Исходные параметры системы (3) [3]: $C_p = 8250$; $x_p = 1,0$; $y_p = 0,75$; $u_p = 1,1$; $q_p = 1,3$; $w_p = 0,2$; $C_v = 332$; $x_v = 0,1$; $y_v = 0,4$; $q_v = 0,2$; $u_v = 0,2$; $p_v = 0$; $m = 0,2$.

Из анализа полученных результатов следует, что при условии максимальной загрузки станка по мощности и полного использования фрезы по стойкости:

- увеличение глубины резания, например, при $N = 10$ кВт и $T = 180$ мин от 0,37 до 1,81 мм, т.е. в 4,9 раза, сопровождается увеличением скорости резания от 88 до 291 м/мин, т.е. в 3,3 раза, уменьшением подачи от 3,0 до 0,1 мм/зуб, т.е. в 30 раз, и снижением производительности от 246 до 134 см³/мин, т.е. в 1,84 раза;

- увеличение подачи, напротив, хотя и сопровождается снижением глубины и скорости резания, но в итоге приводит к увеличению производительности обработки.

Таким образом, максимум производительности при фрезеровании (как и при точении [9]) достигается при назначении наибольшей подачи, но не глубины резания. Это подтверждает вывод ряда исследователей (Г.И. Темчина [6] и др.), занимавшихся моделированием процессов резания, о том, что законы, сформулированные С.Ф. Глебовым, недостаточно обоснованы.

Полученный вывод хорошо также согласуется с результатами исследований по силовому резанию, т.е. резанию с большими подачами.

Силовое резание. Инициатором силового резания был токарь-новатор В.А. Колесов [10]. С целью повышения производительности обработки он работал с подачами до 10...15 мм/об при точении. Идеи силового резания в дальнейшем получили развитие в ряде исследований [11], в том числе и при фрезеровании, но широкого распространения в практике не получили, поскольку не вписывались в рамки концепции, сформулированной С.Ф. Глебовым. В настоящее время для обработки деталей с большими подачами применяются в основном режущие инструменты, производимые зарубежными фирмами [1] и фактически представляющие собой усовершенствованную конструкцию резца В.А. Колесова.

Таким образом, увеличение подачи является общим в концепциях силового и скоростного силового резания. Отличие же их в том, что последняя устанавливает взаимосвязь скорости, глубины резания и подачи через систему уравнений модели (2). Глубина резания при этом может быть меньше припуска, т.е. снятие припуска производится за несколько рабочих ходов инструмента. Во-вторых, данная концепция решает задачу повышения производительности (объема снимаемого в единицу времени материала) также и за счет увеличения скорости резания (см. ниже), т.е. в ней объединены основные достоинства как силового, так и скоростного резания.

Табличные же методы назначения параметров режима резания, изложенные в справочниках [3; 5 и др.], реализуют в основном концепцию глубинного резания, поскольку рекомендуют назначение максимальной глубины резания.

Скоростное резание. Одним из основоположников метода скоростного резания был немецкий ученый М. Кроненберг [12]. Для достижения максимальной производительности он предлагал увеличивать скорость резания, в том числе и за счет уменьшения площади сечения срезаемого слоя, поэтому метод назван «скоростным». Взяв за основной параметр площадь сечения срезаемого слоя, автор не учитывал разную степень влияния подачи и глубины резания на силу резания (мощность) и допустимую скорость резания. Под нагрузкой станка и режущего инструмента М. Кроненберг понимал работу с определенной площадью срезаемого слоя. В отечественных справочных пособиях практически отсутствуют зависимости скорости и силы резания от площади среза. Более привычными и широко используемыми являются стойкостные и силовые зависимости, приведенные в модели (2).

Отличительной особенностью изложенной ниже концепции скоростного силового резания является то, что для достижения наибольшей производительности обработки необходимо обеспечить полную загрузку станка по мощности и использование режущего инструмента по стойкости, подача и глубина резания в модели (2) представлены как независимые переменные, а под использованием режущего инструмента понимается обеспечение заданного периода стойкости T .

Увеличение скорости резания может быть достигнуто двумя основными методами [7]:

- за счет увеличения скорости, допускаемой инструментом при заданном периоде стойкости T , т.е. путем повышения его качества (улучшения инструментального материала и его структуры, применения износостойких покрытий, совершенствования конструкции и геометрии инструмента и т.д.);

- за счет снижения периода стойкости T режущего инструмента.

Моделирование влияния допускаемой инструментом скорости резания на производительность обработки и соотношение параметров режима резания выполнялось путем изменения параметра C_v , поскольку именно C_v в модели (2) характеризует качество инструмента [7; 9; 12]. Рост C_v соответствует увеличению допускаемой инструментом скорости резания при том же значении заданного периода стойкости T .

Один из методов повышения эксплуатационных свойств режущих инструментов – применение износостойких покрытий (однослойных и многослойных). Коэффициент k [13] повышения допускаемой скорости резания зависит от марки покрытия и, по сути, является поправочным коэффициентом для C_v в формуле допускаемой скорости резания (значения коэффициента k приведены в таблице 2), т.е.

$$v = \frac{k C_v D^{q_v}}{T^{m_t} S_z^{y_v} B_z^{u_v} z^{p_v}} \quad (3)$$

Таблица 2

Коэффициент k повышения скорости резания для твердых сплавов при применении покрытий

Вид покрытия	Коэффициент k
Без покрытия	1,00
TiN	1,15
Ni – P + TiN	1,20
TiC	1,25
TiN + Al ₂ O ₃ + Ti(C, N)	1,30
Ni – P + TiC	1,45
Комбинированные покрытия	1,55
Ni – P + Ti(C, N)	1,60
Ni – P + комбинированные покрытия	1,75

Результаты расчета при $N = 10$ кВт, $S_z = 0,8$ мм/зуб и $T = 90$ мин представлены в виде графиков на рисунке 1. Увеличение C_v от 300 до 450 позволяет увеличить скорость резания в 1,6 раза, при одновременном снижении глубины резания (и площади сечения срезаемого слоя) в 1,4 раза. Благодаря тому, что возрастание скорости резания происходит в большей степени, чем снижение глубины, объем снимаемого в единицу времени материала увеличивается.

В результате в дополнение к концепции силового резания повышение производительности обеспечивается также и за счет роста скорости резания в соответствии с концепцией скоростного резания. С точки зрения снижения сил резания и нагрузок на приводы станка увеличение объема удаляемого материала при меньшей площади среза является предпочтительным.

Наиболее эффективный метод повышения скорости резания, допускаемой инструментом, – это использование современных твердых сплавов. Например, при фрезеровании деталей из конструкционной легированной стали (код стали 01.1 по Sandvik Coromant, группа обрабатываемости по ISO – P), являющейся аналогом стали 45, применяются фрезы с ромбической пластиной твердого сплава GC4020

(«Sandvik Coromant») с трехслойным CVD покрытием TiCN – Al₂O₃ – TiN [1] (рис. 2). Данный твердый сплав обладает более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению со сплавом Т15К6.

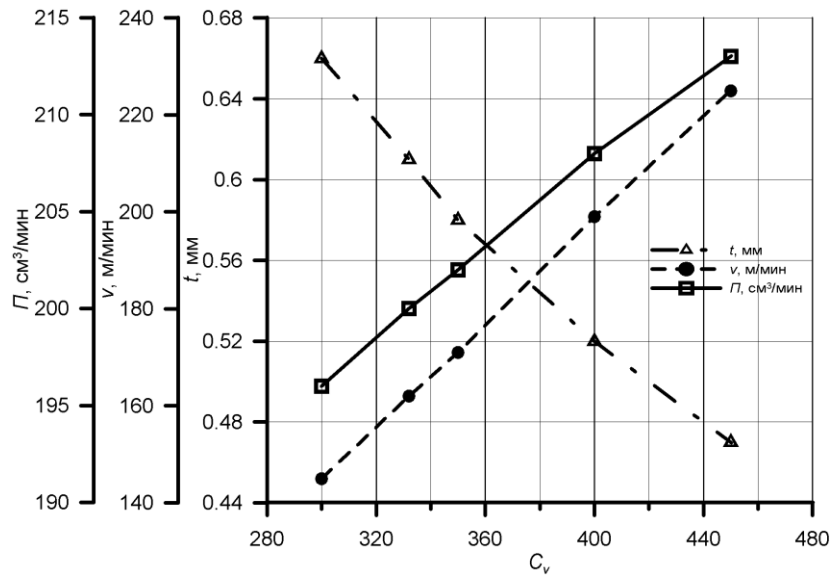


Рис. 1. Зависимость v , P и t от коэффициента C_v при полной загрузке станка по мощности ($N = 10$ кВт) и фрезы по стойкости ($T = 90$ мин) для твердого сплава Т15К6 при $S_z = 0,8$ мм/зуб

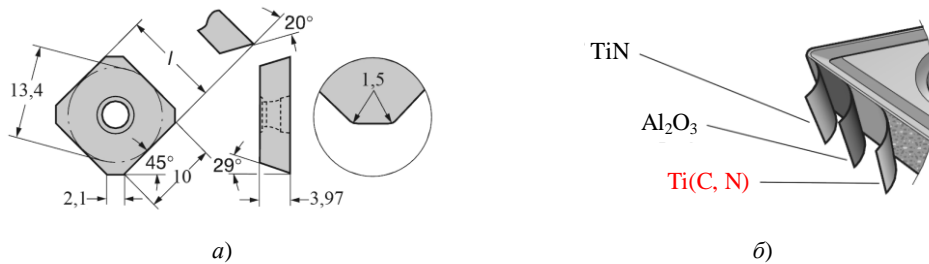


Рис. 2. Пластина R245-12 T3 M-PL из сплава GC4020 (а) с износостойким CVD покрытием TiCN – Al₂O₃ – TiN (б) [1]

Параметры модели (2) для сплава GC4020 следующие: $C_v = 510$; $x_v = 0,1$; $y_v = 0,4$; $q_v = 0,2$; $u_v = 0,2$; $p_v = 0$; $m = 0,2$; $C_p = 8250$; $x_p = 1,0$; $y_p = 0,75$; $u_p = 1,1$; $q_p = 1,3$; $w_p = 0,2$.

Решение модели (2) для твердых сплавов Т15К6 и GC4020 приведено в таблице 3 при $D = 125$ мм; $z = 10$; $B = 100$ мм; $N = 20$ кВт; $T = 60$ мин.

Таблица 3

Значения параметров режима резания и производительность снятия материала в соответствии с моделью (2) при торцевом фрезеровании деталей из конструкционной стали фрезами из твердых сплавов Т15К6 и GC4020

S_z , мм/зуб	Марка твердого сплава					
	Т15К6			GC4020		
	t , мм	v , м/мин	P , см ³ /мин	t , мм	v , м/мин	P , см ³ /мин
0,05	4,38	438	244	3,02	698	268
0,10	3,17	343	276	2,18	546	303
0,20	2,29	268	313	1,58	428	344
0,30	1,90	232	337	1,31	371	369
0,40	1,66	210	354	1,14	335	389
0,50	1,49	194	369	1,03	309	405
0,60	1,37	182	381	0,94	290	418
0,80	1,20	164	401	0,83	262	441
1,00	1,08	152	418	0,74	242	458

Полученные результаты также подтверждают положение о том, что в соответствии с концепцией скоростного силового фрезерования, возрастание скорости резания и производительности обработки при одновременном снижении глубины резания (площади срезаемого слоя) достигается за счет увеличения допускаемой инструментом скорости в соответствии с увеличением параметра C_v в модели (2).

Поскольку расчет производительности фрезерования в рассмотренных примерах (рис. 1, табл. 1) выполнен при постоянной мощности, то повышение P с ростом C_v на первый взгляд кажется незначительным. Ниже будет показано, что основной резерв увеличения производительности связан с возможностью увеличения предельной мощности главного привода станка до такого уровня, при котором параметры сечения срезаемого слоя возрастают до рекомендуемых значений при черновой обработке. Такая возможность появляется благодаря уменьшению глубины t при увеличении скорости резания v (см. табл. 1 и табл. 3).

Влияние мощности привода главного движения станка на производительность фрезерования. Приведенные в таблице 1 результаты показывают, что увеличение мощности двигателя привода главного движения станка приводит к увеличению объема снимаемой стружки в единицу времени. Но обращает на себя внимание тот факт, что для конкретного инструментального материала (материала фрезы) рост производительности P при увеличении N происходит главным образом за счет увеличения глубины резания t , поскольку скорость резания ограничена режущим инструментом в соответствии с уравнением $v = f(T)$ модели (2). В результате возможности увеличения мощности главного привода станка ограничены параметрами качества режущего инструмента. При завышенной мощности расчетная величина t может превысить рекомендуемые для практического применения пределы [2; 14], т.е. возрасти до величин, которые невозможно реализовать на практике.

В то же время из приведенных выше результатов моделирования следует, что с повышением эмпирического коэффициента C_v в формуле скорости (2) происходит снижение t . Это в свою очередь открывает возможности для повышения мощности привода станка. Используя модель (2), выразим связь мощности N с параметром C_v , решив для этого систему уравнений относительно N :

$$N = \frac{C_p C_v^{1-w_p} \cdot t_{ном}^{x_p+y_p(w_p-1)} \cdot S_{зном}^{y_p+y_p(w_p-1)} \cdot D^{u_p+w_p(1+u_p-q_p)-q_p+q_v-u_p} \cdot z^{1+p_p(w_p-1)} \cdot T^{m_p(w_p-1)} \cdot \pi^{m_p} \cdot 1,25^{u_p(1-w_p)-u_p}}{1020 \cdot 60 \cdot 1000^{w_p}}, \quad (4)$$

где $t_{ном}$ и $S_{зном}$ – номинальные (расчетные) значения глубины резания и подачи на зуб, соответствующие предельным значениям параметров сечения срезаемого слоя при черновом фрезеровании.

Формула (4) позволяет определить предельное значение мощности главного привода фрезерного станка для выбранного инструмента (для заданной величины C_v). Рекомендуемые [14] величины t и S_z для черновой обработки приведены в таблице 4 в виде некоторого диапазона значений.

Таблица 4

Подачи при черновом фрезеровании твердосплавными торцовыми фрезами

Марка твердого сплава	Обрабатываемый материал		Главный угол в плане $\varphi, ^\circ$			
	наименование	механические свойства	60	45	30	15
			Глубина резания $t, мм$			
			1...12	1...8	1...5	1...3
Подача на один зуб фрезы $S_z, мм/зуб$						
Т5К6	Сталь	$\sigma_g \leq 600$ МПа	0,24...0,35	0,28...0,42	0,40...0,60	0,70...1,10
		$\sigma_g = 610 - 800$ МПа	0,16...0,24	0,19...0,28	0,28...0,40	0,54...0,80
		$\sigma_g = 810 - 1000$ МПа	0,12...0,18	0,15...0,22	0,21...0,32	0,38...0,58
		$\sigma_g = 1010 - 1200$ МПа	0,09...0,14	0,12...0,18	0,17...0,25	0,32...0,48
Т15К6		$\sigma_g \leq 600$ МПа	0,15...0,23	0,18...0,27	0,25...0,38	0,48...0,72
		$\sigma_g = 610 - 800$ МПа	0,12...0,18	0,15...0,22	0,18...0,26	0,32...0,48
		$\sigma_g = 810 - 1000$ МПа	0,10...0,13	0,12...0,16	0,15...0,22	0,25...0,38
		$\sigma_g = 1010 - 1200$ МПа	0,07...0,10	0,08...0,12	0,12...0,17	0,22...0,38
ВК8	Чугун	$HB \leq 180$	0,46...0,70	0,52...0,80	0,70...1,2	1,20...2,20
		$HB = 181 - 200$	0,42...0,65	0,50...0,75	0,65...1,10	1,20...2,00
		$HB = 201 - 220$	0,36...0,60	0,45...0,70	0,60...1,00	1,00...1,80
		$HB = 225 - 240$	0,30...0,48	0,38...0,60	0,55...0,85	0,90...1,50
ВК6		$HB \leq 180$	0,30...0,46	0,36...0,58	0,52...0,80	0,90...1,50
		$HB = 181 - 200$	0,28...0,42	0,34...0,53	0,45...0,75	0,80...1,30
		$HB = 201 - 220$	0,24...0,38	0,30...0,48	0,40...0,70	0,30...1,10
		$HB = 225 - 240$	0,20...0,32	0,27...0,42	0,35...0,55	0,55...0,90

На рисунке 3 приведены значения параметров режима резания и производительности снятия материала для фрез, оснащенных пластинами твердого сплава T15K6 и GC4020 с покрытием TiCN – Al₂O₃ – TiN. При $N = 20$ кВт в диапазоне подач $S_z = 0,1 \dots 1,0$ мм/зуб расчетная глубина резания снизилась для GC4020 по сравнению с T15K6 от $3,17 \dots 1,08$ до $2,18 \dots 0,74$ мм (рис. 3, а). Поэтому для твердого сплава GC4020 мощность привода главного движения может быть увеличена до 29,0 кВт. Глубина резания в этом случае возрастает до значений $3,27 \dots 1,11$ мм, что соответствует параметрам сечения срезаемого слоя для T15K6.

Вследствие увеличения C_v до величины $C_v = 510$ для сплава GC4020 скорость резания возрастает от $343 \dots 152$ до $525 \dots 233$ м/мин (рис. 3, б). В результате производительность обработки увеличивается от $276 \dots 418$ до $436 \dots 659$ см³/мин, т.е. в 1,6 раза (рис. 3, в).

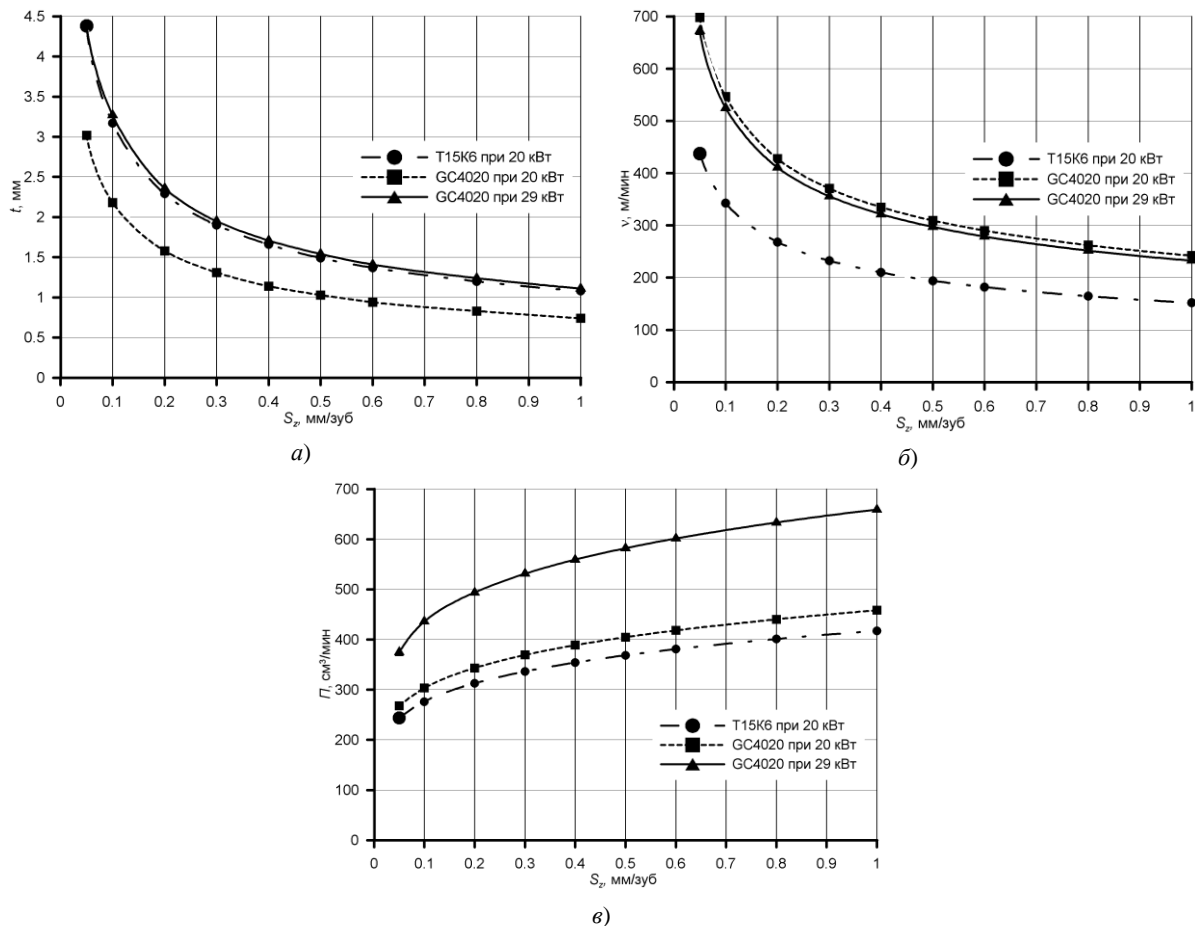


Рис. 3. Расчетные значения t (а), v (б), и P (в) для твердых сплавов T15K6 и GC4020 при мощности резания 20 и 29 кВт

Таким образом, в соответствии с концепцией скоростного силового резания увеличение допускаемой инструментом скорости резания (увеличение C_v) при использовании более качественного инструмента, сопровождающееся снижением глубины резания, позволяет увеличить производительность обработки за счет повышения мощности привода главного движения станка до такого уровня, при котором параметры сечения срезаемого слоя возрастают до рекомендуемых значений при черновой обработке.

Влияние стойкости T на производительность. Увеличение скорости резания может быть достигнуто также путем снижения заданного периода стойкости T режущего инструмента. Анализ результатов расчета, приведенных в таблице 1, показывает, что рост скорости при снижении T приходится компенсировать уменьшением t для обеспечения полной загрузки станка по мощности. В результате объем снимаемого материала в единицу времени практически не изменяется. В то же время сьем материала при большей скорости резания и меньшей площади сечения срезаемого слоя является предпочтительным с точки зрения снижения сил резания и нагрузок на приводы металлорежущего станка. В этом заключается положительный результат от снижения T с позиции концепции скоростного силового резания. Кроме того, снижение глубины резания при уменьшении T также является резервом повышения мощности главного привода станка и производительности обработки в соответствии с изложенной выше концепцией.

Практическая реализация концепции скоростного силового фрезерования. Выбор величины подачи при скоростном силовом резании определяется конструкцией и геометрическими параметрами режущего инструмента, а также требованиями к качеству обработанной поверхности.

В последнее время в технической литературе появляются примеры технологий, в большой степени соответствующие концепции скоростного силового резания. Например, фирма Sandvik Coromant [1] предлагает твердосплавные пластины для фрез, работающих с подачей 4 мм/зуб, что намного превышает традиционные подачи. Особенно эффективным является фрезерование с большой подачей при обработке карманов в сплошном материале (рис. 4).

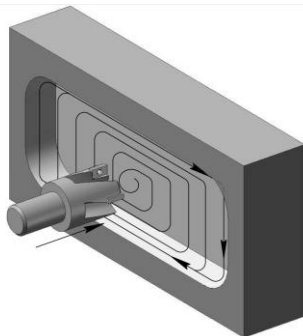


Рис. 4. Высокопроизводительное фрезерование с большой подачей кармана в сплошном материале с врезанием по трем осям [1]

Несмотря на снижение глубины резания до 1,2...2 мм при торцевом фрезеровании достигается снятие очень большого объема стружки – 1400 см³/мин. Для удаления всего припуска применяется фрезерование с врезанием по двум или трем осям, а также прерывистое врезание и фрезерование с предварительным засверливанием.

Выводы. Основные положения концепции скоростного силового фрезерования могут быть сформулированы следующим образом:

1) *скоростное силовое фрезерование* – это метод обработки деталей, при котором одновременно используются преимущества *силового и скоростного методов* с целью достижения наибольшей производительности, характеризуемой объемом удаляемого материала в единицу времени;

2) в соответствии с предлагаемой концепцией связь между параметрами режима резания определяется математической моделью, включающей уравнения: эффективной мощности резания:

$$N = \frac{C_p \cdot t^{x_p} \cdot S_z^{y_p} \cdot B^{u_p} \cdot z v}{61200 \cdot D^{q_p} \cdot n^{w_p}}$$

и допускаемой режущим инструментом скорости резания:

$$v = \frac{k \cdot C_v \cdot D^{q_v}}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{u_v} \cdot z^{p_v}},$$

а также уравнение целевой функции в виде производительности обработки:

$$\Pi = \frac{B}{\pi D} \cdot \frac{t \cdot S_z \cdot z v}{1000};$$

3) наибольшая производительность фрезерования достигается при максимальной загрузке станка по мощности и полном использовании фрезы по стойкости, а также при назначении *максимально возможной подачи*;

4) данная концепция решает и задачу повышения производительности (объема снимаемого в единицу времени материала) *за счет увеличения скорости резания*. Это достигается применением режущего инструмента более высокого качества, характеризуемого в предложенной математической модели параметром C_v . Повышение C_v , кроме того, дает возможность производить обработку деталей при меньшей глубине резания и площади сечения срезаемого слоя, что является благоприятным фактором с точки зрения снижения нагрузок на приводы станка. Глубина резания при этом может быть меньше припуска, т.е. снятие припуска производится за несколько рабочих ходов инструмента;

5) увеличение скорости резания при снижении заданного периода стойкости T режущего инструмента приходится компенсировать уменьшением глубины резания t для обеспечения полной загрузки

станка по мощности. В результате объем снимаемого материала в единицу времени практически не изменяется. В то же время съём материала при большей скорости резания и меньшей площади сечения срезаемого слоя является предпочтительным;

б) в соответствии с концепцией скоростного силового резания увеличение параметра C_v , сопровождающееся снижением глубины резания, позволяет увеличить производительность обработки за счет повышения мощности привода главного движения станка до такого уровня, при котором параметры сечения срезаемого слоя возрастают до рекомендуемых значений при черновой обработке.

Снижение глубины резания при уменьшении T также является резервом повышения мощности главного привода станка и производительности обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по металлообработке. Точение – фрезерование – сверление – растачивание – оснастка: техн. справочник Sandvik Coromant. – М.: ОАО «Сандвик – МКТС», 2005. – 553 с.
2. Туромша, В.И. Взаимосвязь параметров металлорежущего станка и инструмента / В.И. Туромша // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 23 – 32.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
4. Глебов, С.Ф. Теория наивыгоднейшего резания металлов / С.Ф. Глебов. – М.: Госмашметиздат, 1933. – 448 с.
5. Панкин, А.В. Обработка металлов резанием / А.В. Панкин. – М.: Машгиз, 1961. – 820 с.
6. Темчин, Г.И. Многоинструментные наладки. Теория и расчет / Г.И. Темчин. – М.: Машгиз, 1963. – 543 с.
7. Рыжкин, А.А. Обработка материалов резанием: учеб. пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 411 с.
8. Туромша, В.И. Обеспечение максимальной загрузки станка и полного использования режущего инструмента / В.И. Туромша // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 160 – 166.
9. Туромша, В.И. Концепция скоростного силового резания / В.И. Туромша // Вестник Белорусско-российского ун-та. Сер. Машиностроение. – 2010. – № 2(27). – С. 101 – 112.
10. Колесов, В.А. Силовое резание металлов / В.А. Колесов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1953. – 78 с.
11. Промптов, А.И. Скоростное и силовое точение металлов / А.И. Промптов, Л.А. Хворостухин. – Иркутск: Иркутское книжное издательство, 1957. – 57 с.
12. Кроненберг, М. Основы теории резания. Введение в теорию обработки металлов резанием и применение ее на практике / М. Кроненберг. – М.: ГТИ, 1931. – 182 с.
13. Инструментальные материалы: учеб. пособие / Г.А. Воробьева [и др.]. – СПб.: Политехника, 2005. – 268 с.
14. Справочник металлста: в 5 т. / редкол.: Н. Ачеркан (гл. ред.) [и др.]. – М.: Машгиз, 1957 – 1959. – Т. 4; Е. Анненкова [и др.]; под ред. А.Н. Малова. – 1959. – 779 с.

Поступила 13.10.2011

HIGH SPEED POWER MILLING

V. TUROMSHA

The proposed concept of milling realizes the advantages of both high speed and power cutting to get the largest stock removal capacity. Proceeding from the conditions of the maximum capacity of the machine tool and the full application of the cutting tool by durability, the maximum capacity is achieved when setting the maximum possible feed. The increase in the capacity by raising the cutting speed is achieved by using the cutting tool of a higher quality. Stock removal is carried out in several cutting passes of a tool. Increasing the main motion drive power of a machine tool to the level when the cross-section parameters of the layer being removed grow to the recommended values in roughing permits the milling capacity to be increased.

УДК 621.833.16

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭКСЦЕНТРИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ
С ПОВЫШЕННЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ УРОВНЕМ**

*канд. техн. наук О.Е. ПЕЧКОВСКАЯ, д-р техн. наук, проф. М.Ф. ПАШКЕВИЧ,
канд. техн. наук Ю.В. МАШИН
(Белорусско-Российский университет, Могилёв)*

Рассмотрены пути расширения кинематических возможностей и повышения нагрузочной способности эксцентрикковых передач на основе модификации зацепления. Представлена методика расчета и проектирования эксцентрикковых зубчатых передач с разностью чисел зубьев колес во внутреннем эвольвентном зацеплении, равной единице, отличающихся высокими значениями передаточных отношений в одной ступени, минимальными габаритами по сравнению с другими существующими передачами, а также повышенной нагрузочной способностью. На основе 3D-моделирования показан наиболее технологичный способ модификации зацепления применительно к одному из зацепляющихся колес. Рассмотрена внутренняя зубчатая передача с позиции многопарности зацепления. Изложены методика прочностного расчета эксцентрикковой передачи с модифицированным зацеплением, а также результаты экспериментальных исследований кинематической точности и плавности работы опытного образца малогабаритного редуктора.

Одна из актуальных задач, стоящих перед инженерами-конструкторами, – разработка принципиально новых механизмов, отвечающих требованиям современного машиностроения и позволяющих при обеспечении ресурсосбережения улучшить эксплуатационные показатели машин, повысить их качество. Технический уровень машин определяется соответствующим уровнем передаточных механизмов в их приводах, т.е. нагрузочной способностью, надежностью, КПД, быстроходностью и материалоемкостью этих механизмов. Наиболее высокий технический уровень приводов обеспечивает применение эксцентрикковых зубчатых передач, сочетающих в себе малые габаритные размеры при значительной передаваемой мощности и широких кинематических возможностях в части достижения больших передаточных отношений. И хотя такие передачи достаточно изучены, их исследования активно продолжаются с использованием современных компьютерных технологий, которые позволяют на основе моделирования зубчатых зацеплений пересмотреть традиционные точки зрения и уточнить ранее сформулированные положения. Применение современных пакетов программ 3D-моделирования позволяет не только ускорить процесс проектирования передач, но и обеспечить требуемые их эксплуатационные свойства.

Основная часть. Моделирование внутреннего зубчатого зацепления в эксцентрикковых передачах позволило нам получить новые сведения о возможности реализации такого зацепления даже при разности чисел зубьев центрального колеса с внутренними зубьями и сателлита, равной единице, при которой достигается наибольшее передаточное отношение передачи [1]. Такое зацепление определяет значительное уменьшение габаритных размеров и материалоемкости передачи и, следовательно, делает ее наиболее компактной и малогабаритной при прочих равных условиях.

Наиболее просто реализовать зацепление с разностью чисел зубьев, равной единице, можно путем регулирования диаметров зацепляющихся колес [2]. Так, для размещения сателлита с числом зубьев z_1 внутри центрального колеса с числом зубьев z_2 диаметр делительной окружности d_{a1} необходимо выбирать по следующему соотношению:

$$d_{a1} = mz_2, \quad (1)$$

где m – модуль зацепления,
а величину эксцентриситета эксцентрика принимать равной

$$e = m. \quad (2)$$

В этом случае диаметральные размеры сателлита оказываются уменьшенными, высота зубьев сателлита и размеры центрального колеса с внутренними зубьями подчиняются известным соотношениям теории эвольвентных зацеплений, а передаточное отношение передачи при этом оказывается равным числу зубьев сателлита ($i = z_1$). Однако необходимо учитывать интерференцию, имеющую место при малой разности чисел зубьев, и профиль зубьев одного или обоих зацепляющихся колес требуется модифицировать. Лучше всего проводить модификацию сателлита. Определение величины и способа модификации при этом возможно на основе имитации работы зубчатого зацепления путем создания компьютерных моделей.

Анализ моделей позволил определить величину интерференции зубьев при различных условиях зацепления, устранить ее и, таким образом, получить фактически форму профиля и размеры модифицированных зубьев, что в свою очередь позволило найти наиболее технологичные методы модификации, а также оценить коэффициент перекрытия передач. Этот анализ также дал возможность визуализировать профиль модифицированного зуба и доказать основное требование модификации: модифицированный профиль зуба должен быть эквидистантным исходному профилю. Соблюдение данного требования при формообразовании зубчатых венцов модифицированных сателлитов с любым числом зубьев не представляет сложностей при использовании стандартных инструментов в процессе традиционной технологии нарезания зубьев методом обката. По своей сущности модификация профиля зубьев представляет собой их чистовую обработку известными способами (чистовое зубофрезерование, чистовое зубодолбление, шевингование, шлифование). При этом припуск на чистовую обработку зубьев с каждой стороны выбирается равным величине тангенциального смещения ΔS , обеспечивающего наличие гарантированного бокового зазора, который равномерно увеличивается с возрастанием модуля, независимо от числа зубьев зацепляющихся колес:

$$\Delta S = 0,2m. \quad (3)$$

На основе анализа компьютерных моделей было также установлено, что независимо от числа зубьев сателлита и направления его вращения в зацеплении состоит несколько пар зубьев (рис. 1), расположенных симметрично оси симметрии эксцентрика и на некотором удалении от этой оси, т.е. имеет место многопарность зубчатого зацепления.

Так, при вращении сателлита по часовой стрелке в зацеплении находятся пары зацепляющихся зубьев, расположенные справа от плоскости симметрии передачи (3, 4, 5), а при его вращении против часовой стрелки крутящий момент передают пары зубьев, расположенные слева от плоскости симметрии передачи (3', 4', 5'). Это позволяет утверждать, что передача с модифицированным зацеплением хорошо может зарекомендовать себя в условиях реверсивной работы.

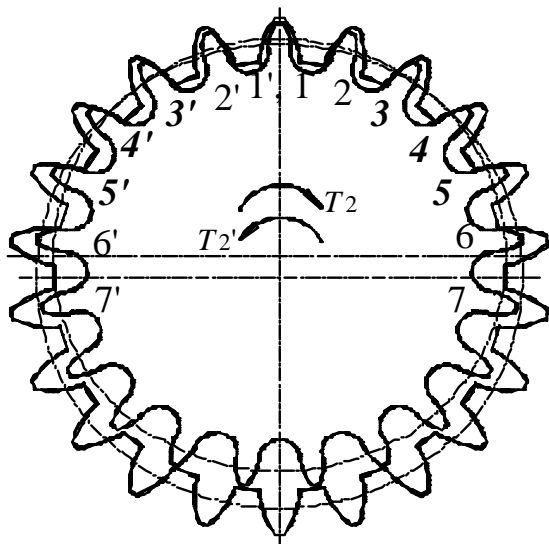


Рис. 1. Схема модифицированного зубчатого зацепления ($z_1 = 21$)

Установлено, что нагрузку передают две или три пары зубьев модифицированной передачи. В зацеплениях с числами зубьев сателлита, находящихся в интервалах 24...27, 33...36, 42...45, 51...54 и т.д., через четыре, вращение передают две пары зубьев, т.е. число пар зубьев, гарантированно состоящих в зацеплении $n_z = 2$, а в зацеплениях с числами зубьев сателлита, находящихся в интервалах 28...32, 37...41, 46...50 и т.д., через пять, вращение передают три пары зубьев: $n_z = 3$.

Из схемы, представленной на рисунке 1, также следует, что с обеих сторон от указанных трех пар зубьев, находящихся в зацеплении, в парах зубьев с номерами 2 (2') и 6 (6') имеют место незначительные зазоры. С увеличением z_1 эти зазоры уменьшаются и составляют сотые доли миллиметра для десяти и более пар зубьев. Эти пары зубьев, учитывая наличие погрешностей (аппроксимации, построения, сборки, изготовления), при передаче нагрузки и возникновении упругих деформаций окажутся работающими. Путем моделирования зацеплений в широком диапазоне чисел зубьев установлено, что в модифицированных эксцентриковых передачах с разностью чисел зубьев колес, равной единице, число пар зацепляющихся зубьев с учетом их податливости составляет от 12 до 20 % от числа зубьев сателлита.

Следовательно, в отличие от немодифицированной зубчатой передачи, где коэффициент перекрытия обычно невелик, в предложенной передаче одновременно в зацеплении участвует значительно большее число пар зубьев. Это позволяет разделить передаваемую нагрузку на большее число зацепляющихся пар и тем самым значительно повысить нагрузочную способность передачи при обеспечении минимальных массогабаритных параметров.

Следовательно, в отличие от немодифицированной зубчатой передачи, где коэффициент перекрытия обычно невелик, в предложенной передаче одновременно в зацеплении участвует значительно большее число пар зубьев. Это позволяет разделить передаваемую нагрузку на большее число зацепляющихся пар и тем самым значительно повысить нагрузочную способность передачи при обеспечении минимальных массогабаритных параметров.

Нагрузочная способность рассматриваемой эксцентриковой передачи в значительной степени определяется механизмом снятия редуцированного вращения с сателлита на ведомый вал. Наиболее простым по конструкции механизмом передачи вращения от сателлита к ведомому валу являются оси (пальцы), закрепленные в сателлите. На рисунке 2 представлена схема, реализующая такой механизм.

Так, вращение ведущего вала h с помощью водила, выполненного в виде эксцентрика, преобразуется во вращательное движение сателлита, который установлен с возможностью свободного вращения. Сателлит обкатывается по центральному колесу, совершая планетарное движение вокруг оси ведущего вала. При работе передачи оси (или пальцы) обкатываются по поверхности отверстий, выполненных во фланце ведомого вала b , и передают нагрузку. Диаметр отверстий во фланце выбирается по соотношению

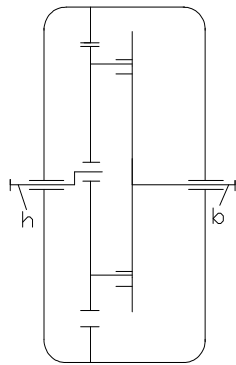


Рис. 2. Механизм передачи вращения от сателлита к ведомому валу

$$D = d + 2e, \tag{4}$$

где d – диаметр пальца.

Проведем силовой анализ эксцентриковой передачи с модифицированным зубчатым зацеплением. Для этого рассмотрим схему, представленную на рисунке 3.

Принимая во внимание, что зубья внутреннего колеса являются модифицированными (более тонкими) и, следовательно, ослабленными, расчет на прочность таких передач следует проводить применительно к зубьям сателлита. При этом классические методы расчета эвольвентных зубчатых передач на прочность [3] требуют изменений и уточнений в связи с модификацией зацепления.

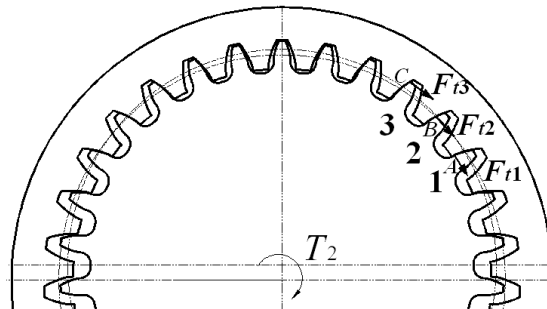


Рис. 3. Схема для силового анализа ($z_1 = 50$):

A, B, C – точки контакта зубьев сателлита и центрального колеса; 1, 2, 3 – номера контактирующих зубьев сателлита

С учетом многопарности зацепления значение окружной силы, действующей на один зуб и служащей для расчета на прочность зуба сателлита, принимается равным

$$F_{tp} = F_t k_i = 2T_2 k_i / d_1, \tag{5}$$

где F_t – окружная сила в зацеплении; T_2 – передаваемый момент; k_i – коэффициент, учитывающий распределение нагрузки, соответствует модифицированному зубу, состоящему в зацеплении и подлежащему расчету на прочность (см. рис. 3).

Анализ результатов расчета коэффициентов, учитывающих распределение нагрузки, проиллюстрирован на рисунке 4.

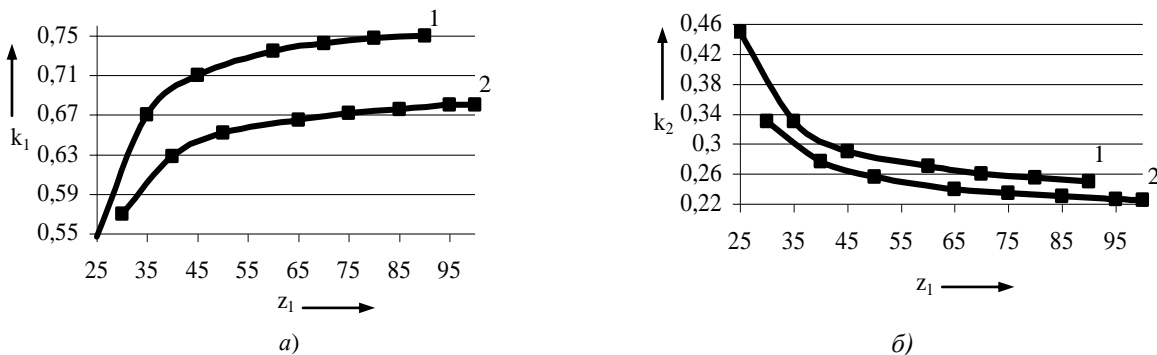


Рис. 4. Зависимости коэффициентов, учитывающих распределение нагрузки k_1 (а) и k_2 (б), от числа зубьев сателлита: 1 – $n_z = 2$; 2 – $n_z = 3$

Видно, что для широкого диапазона чисел зубьев колес независимо от модуля зацепления эти коэффициенты составляют:

$$k_1 = 0,55...0,75; \quad (6)$$

$$k_2 = 0,45...0,23; \quad (7)$$

$$k_3 = 0,0935...0,0941. \quad (8)$$

Наибольшие контактные напряжения независимо от числа зубьев сателлита, модуля зацепления и числа зубьев n_z , состоящих в зацеплении, возникают на поверхности зуба сателлита с номером 1 в точке контакта A , а напряжения изгиба – в зубе с номером 2 при его взаимодействии с зубом центрального колеса в точке B (см. рис. 3). При этом условие прочности зубьев по контактным напряжениям при разности чисел зубьев колес, равной единице, имеет вид:

$$\sigma_H = 1,18 \sqrt{\frac{ET_2 k_1 k_H}{bm^2 z_1 z_2 \operatorname{tg} \alpha_{a2} (0,47 z_2 \operatorname{tg} \alpha_{a2} - 0,88)}} \leq \sigma_{Hp}, \quad (9)$$

где E – приведенный модуль упругости; k_H – коэффициент расчетной нагрузки по контактным напряжениям; b – ширина венца сателлита; σ_{Hp} – допускаемые контактные напряжения; α_{a2} – угол профиля зуба центрального колеса на окружности вершин:

$$\sigma_{a2} = \arccos\left(\frac{0,94 z_2}{z_2 - 1,6}\right). \quad (10)$$

Условие прочности модифицированных зубьев по напряжениям изгиба при разности чисел зубьев $z_d = 1$ имеет вид:

$$\sigma_F = \frac{T_2 k_2 k_F (12,9H - 0,85m)}{m^3 z_1 b} \leq \sigma_{Fp}, \quad (11)$$

где k_F – коэффициент расчетной нагрузки по напряжениям изгиба; σ_{Fp} – допускаемые напряжения изгиба; H – высота зуба до опасного сечения, определяемая по соотношению

$$H = \sqrt{(0,47m z_2 \operatorname{tg} \sigma_{a2} + 2,07m)^2 + (0,47m z_1)^2} - 0,5m(z_1 - 3). \quad (12)$$

При проектных расчетах из условия прочности (11) определяют модуль зацепления m или ширину венца сателлита b . Для обеспечения минимальных (или рациональных) радиальных размеров зубчатой передачи принимают минимальный модуль зацепления и определяют требуемую ширину, удовлетворяющую условию прочности. Если же требуется обеспечить минимальные осевые размеры передачи, определяют требуемое значение модуля зацепления по принятой ширине венца сателлита. Окончательно модуль зацепления выбирают из стандартного ряда. При этом неизвестные параметры оценивают приближенно или руководствуются существующими рекомендациями, основанными на накопленном опыте.

В результате повышенной многопарности зацепления наибольшие величины контактных напряжений в эксцентриковой модифицированной передаче до 1,3 раз меньше, чем в стандартном зацеплении, также обеспечивающем разность чисел зубьев колес, равную единице, и выполненном на основе смещения исходного контура при нарезании обоих зубчатых колес зацепления. А напряжения изгиба в такой передаче до 1,9 раз меньше, чем в зубьях колес, полученных без смещения и модификации, аналогичной эксцентриковой передаче.

Следует отметить, что зависимости для определения контактных и изгибных напряжений (9) и (11) получены без учета повышенной податливости модифицированных зубьев сателлита, которая в условиях нагружения передачи приводит к значительному увеличению числа пар зубьев, состоящих в зацеплении, и, как следствие, к уменьшению напряжений.

С использованием изложенной методики были рассчитаны, спроектированы и изготовлены опытные образцы эксцентриковых передач с модифицированным зубчатым зацеплением. Для экспериментальной оценки их технического уровня была исследована равномерность вращения ведомого звена, т.е. кинематическая точность передачи в сборе. Исследования проводились на базе автоматизированной системы исследований механических передач, разработанной в Белорусско-Российском университете,

при различных частотах вращения ведущего вала и различных моментах на ведомом валу, а также на холостом ходу. Частоты вращения ведущего вала изменялись при помощи трехскоростного электродвигателя, а величины моментов устанавливались путем нагружения ведомого вала электромагнитным тормозом ПТ-16М.

При оценке кинематических погрешностей и плавности работы передачи использовался стандартный фотоэлектрический преобразователь угловых перемещений ВЕ-178А, который соединялся с ведомым валом передачи, и за один его оборот формировал 2500 прямоугольных импульсов. Порядок обработки информации от первичных преобразователей и представления этой информации в виде графиков и амплитудно-частотных спектров изложен в работе [4].

Функции кинематических погрешностей представлялись в виде кривых, соответствующих одному обороту ведомого вала, а также в виде амплитудно-частотных спектров (рис. 5).

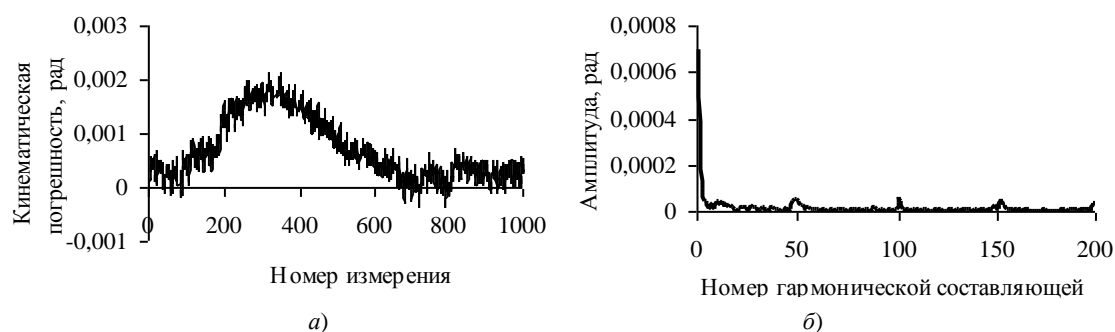


Рис. 5. Изменение кинематической погрешности (а) за один оборот ведомого вала редуктора и ее амплитудно-частотный спектр (б)
($i = 50$, частота вращения $n_1 = 685 \text{ мин}^{-1}$, $T_2 = 11 \text{ Нм}$)

Анализ полученных результатов исследований показал, что графики кинематической погрешности для всех условий работы передач имеют примерно одинаковый вид и представляют собой один период синусоиды, на который наложены высокочастотные колебания, представляющие собой процесс пересоружения зубьев. Амплитудно-частотные спектры кинематической погрешности состоят из распределенных вдоль оси абсцисс уменьшающихся амплитуд гармонических составляющих. Все спектры содержат зоны локализации спектральных составляющих с близкими значениями частот. Выделяются гармонические составляющие с номерами, равными и кратными числам зубьев сателлита и центрального колеса, обусловленные неизбежно существующими погрешностями профилей зубьев зацепляющихся колес и следами формообразующих инструментов на рабочих поверхностях этих зубьев.

Оценивая функции кинематических погрешностей и их амплитудно-частотных спектров, установлено, что модифицированные передачи характеризуются более высокими кинематической точностью и плавностью работы по сравнению со стандартными передачами. Так, редукторы в сборе, построенные на основе таких передач и содержащие колеса, полученные только фрезерованием, обеспечивают кинематическую точность, соответствующую 8-й степени, и плавность работы, соответствующую 7-й степени.

Заключение. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований эксцентриковых зубчатых передач с модифицированным зацеплением, свидетельствуют, что такие передачи характеризуются повышенным техническим уровнем. К их достоинствам относятся:

- минимальные массогабаритные показатели;
- возможность реализации большого передаточного отношения в одной ступени;
- реверсивность;
- высокая технологичность;
- простота конструкции;
- низкая себестоимость изготовления;
- высокая нагрузочная способность;
- высокая кинематическая точность и плавность работы.

Эксцентриковые редукторы, построенные на основе зубчатых передач с модифицированным зацеплением, могут быть рекомендованы к использованию в качестве передаточных механизмов для реализации больших передаточных отношений в компактных приводах различных машин и механизмов.

Разработанные конструкции редукторов нашли практическое применение на предприятиях машиностроения:

- в приводах лебедки для ручного подъема крышки шахтной печи (рис. 6);
- для ручного перемещения кабины пассажирского лифта в аварийных ситуациях;

- в приводах рычажного механизма в станках монтажа-демонтажа автомобильных шин;
 - в качестве усилителей момента к гаечным и динамометрическим ключам при проведении сборочных и ремонтных работ для создания контролируемых моментов затяжки резьбовых соединений и облегчения процесса закрепления деталей.

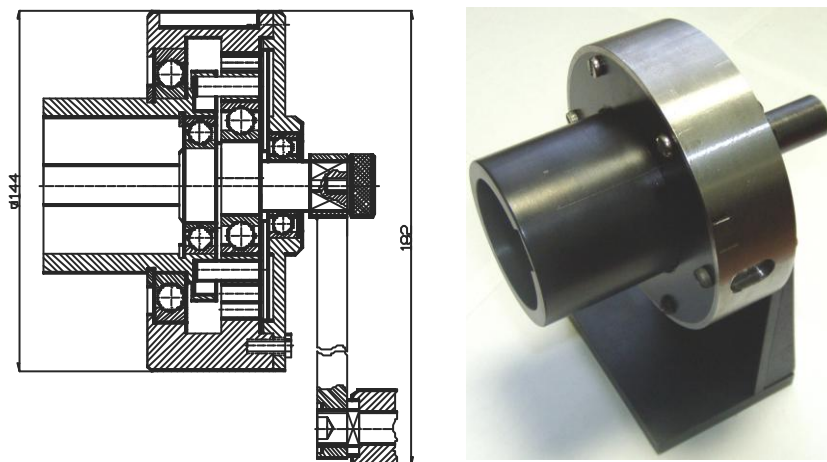


Рис. 6. Малогабаритный редуктор для подъема крышки шахтной печи ($i = 32$)

В перспективе разработанные конструкции редукторов могут широко использоваться в производственных условиях вместо традиционных, серийно выпускаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев, В.Н. Планетарные передачи / В.Н. Кудрявцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 307 с.
2. Планетарная передача: пат. 5092 С2 РБ, МПК⁷ F 16 Н1/28 / А.М. Пашкевич, В.М. Пашкевич, В.В. Геращенко, М.Ф. Пашкевич; заявитель и патентообладатель Могилев. гос. техн. ун-т. – № 19981087; заявлено 30.11.98; опубл. 30.03.03, Бюл. № 1(36). – 161 с.
3. Планетарные передачи: справ. / под ред. В.Н. Кудрявцева, Ю.Н. Кирдяшева. – Л.: Машиностроение, 1977. – 535 с.
4. Пашкевич, М.Ф. Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания / М.Ф. Пашкевич, В.В. Геращенко. – Минск: БелНИИНТИ, 1992. – 248 с.

Поступила 21.10.2011

DESIGN WORK BASES OF ECCENTRIC GEAR DRIVES WITH INCREASED TECHNICAL LEVEL

O. PECHKOVSKAYA, M. PASHKEVICH, Y. MASHIN

Ways of kinematic opportunities expansion and load-carrying capacity increase of eccentric gear drives by the engagement modification are considered. Methods of calculation and design of eccentric gear drives with the difference of internal involute engagement teeth numbers equal to one, distinguished by high values of transmission ratios in one stage, minimal dimensions and increased loading capacity in comparison with other existing gear drives are presented. On the basis of 3D-modelling, the most technological way of engagement modification with reference to one of hooked gearwheel is shown. Internal gear drive from a position of multipaired relationship of engagement is considered. Methods of mechanical calculation of eccentric gear drives with modified engagement and results of experimental investigation of kinematic accuracy and work smoothness of a small-sized reducer pre-production model are stated.

УДК 621.91.01/02

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЧАСТЬ 1. ТЕРМИНЫ И СИСТЕМЫ ОБОЗНАЧЕНИЙ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН, ДЕРЖАВОК И МОДУЛЕЙ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК
(Полоцкий государственный университет)*

Сформулированы основные проблемы конструирования и производства режущих инструментов на отечественных машиностроительных предприятиях. Рассмотрены эквиваленты терминов обработки резанием и обозначений материалов. Проведен анализ типов режущих пластин, режцовых блоков и их крепления в инструментальных модулях, выделены конструктивные особенности инструментальных систем, в том числе для многоцелевой обработки. Даны примеры систем для обтачивания, отрезания, фрезерования, растачивания, выявлены общие тенденции современного развития инструментального обеспечения машиностроительных предприятий.

Введение. Большой резерв повышения эффективности машиностроения заложен в создании рациональной системы инструментального обеспечения отечественных предприятий по опыту ведущих зарубежных фирм, например, «Sandvik Coromant» (Швеция), «Mitsubishi» (Япония), «IsCAR» (Израиль), «Hertel» (Германия) и других. Предложенная фирмами система предусматривает проектирование широкой гаммы режущих инструментов с унифицированными конструктивными элементами для каждого типа инструмента, применение прогрессивных технологий их изготовления, включающих нанесение износостойких покрытий на лезвия, разработку рекомендаций по режиму работы режущих инструментов с учетом свойств обрабатываемого и инструментального материалов, диагностику и ремонт инструмента в процессе эксплуатации. Такой подход к инструментальному обеспечению предприятий позволяет уменьшить номенклатуру режущих инструментов, повысить срок их службы и в конечном итоге сократить материальные и финансовые затраты на проектирование, производство и эксплуатацию режущих инструментов.

В настоящее время анализ конструирования и производства режущих инструментов на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь, его применения в основном производстве позволяет выявить общие проблемы и тенденции, к которым можно отнести следующие:

1) использование большого многообразия видов, типов конструкций и размеров режущих инструментов, которое сложилось исторически с определенной ориентацией на ранее действовавшие стандарты и инструментальные заводы, соответственно, не учитывается специфика нередко узкоспециализированных производств, применение которых сейчас зачастую технически и экономически необоснованно для конкретного предприятия. Кроме того, при освоении предприятием новых изделий не проводятся на должном уровне унификация используемых режущих инструментов (типоразмеров деталей, соединений и узлов инструмента, инструментальных материалов и т.п.) и универсализация их по функциональному назначению, что приводит к неоправданному расширению номенклатуры и дефициту режущих инструментов;

2) отсутствие научно обоснованного системного подхода к организации применения, конструированию и производству режущих инструментов. Работы, проводимые в этом направлении отраслевыми и академическими институтами, вузами, конструкторскими бюро заводов и других организаций, носят несистемный характер и связаны в основном с выполнением заданий государственных научно-технических программ;

3) отсутствие единого координирующего начала в вопросах инструментального обеспечения и производства инструментальных материалов, недостаточная мощность инструментальных заводов, вынуждает машиностроительные предприятия развивать собственные конструкторские и инструментальные отделы и цехи по выпуску инструмента для своих нужд или покупать режущий инструмент у коммерческих и зарубежных фирм, что приводит к дублированию и параллелизму в проектировании и производстве одних и тех же типоразмеров инструментов, росту затрат на инструмент и, в конечном итоге, к удорожанию выпускаемой предприятием продукции.

Современное машиностроение с целью повышения конкурентоспособности ориентируется на выпуск качественной продукции широкой номенклатуры и в небольшом количестве. В связи с этим базовая его отрасль – станкостроение – стремится обеспечить гибкость оборудования путем комплексной механической обработки заготовок на одном станке и создания многофункциональных станков. Технологическая оснатовка, и в частности режущий инструмент (РИ), используемая на этих станках, также должна отвечать требованию многофункциональности. При проектировании таких инструментов перспективно применение модульного принципа и автоматизации процедур, например, выбора и компоновки модулей.

Модульный принцип построения конструкций режущих инструментов широко используется зарубежными фирмами: шведской «Sandvik Coromant»; немецкими «Hertel», «Knuth»; американской «Kennametal» и

другими. Однако следует отметить, что фирмы, располагая мощной материально-технической базой, расширяют номенклатуру модулей, реже используя межтиповую унификацию модулей, что повышает стоимость режущего инструмента и, в конечном итоге, неприемлемо для отечественного машиностроения.

Выход из создавшегося положения может быть найден путем создания гаммы многофункциональной технологической оснастки (МФТО), в частности блочно-модульных режущих инструментов (БМРИ).

Эквиваленты русско-английских терминов обработки резанием и обозначений материалов. В практической работе с представителями зарубежных инструментальных фирм и проспектами выпускаемой ими продукции очень важно для взаимопонимания знать точное соответствие терминов режущих инструментов, процессов обработки материалов резанием и связанных с ними элементов, характеристик, параметров и т.п. на английском и русском языках. Предоставляемые в каталогах переводы с английского на русский зачастую не учитывают применяемые в русскоязычной литературе определения и термины (например, в [1 – 3]), что приводит к разной трактовке одних и тех же понятий. При этом не учитываются появляющиеся, прежде всего за рубежом, новые виды обработки резанием, типы режущих инструментов и их составляющих. Поэтому необходимо пересмотреть определения общих понятий резания согласно [4] с учетом вновь появившихся терминов на английском и русском языках в каталогах фирм «Sandvik Coromant», «Mitsubishi» и других. В частности, авторами предлагается в этот словарь включить общепринятые термины по видам обработки, типам режущих инструментов, физико-химическим процессам при резании, а также новые термины, касающиеся, например, «твердого» и «сухого» резания, «трохоидального» резания и т.п., типов «жесткого» крепления режущих пластин в инструменте, «равномерных» технологий нанесения многослойных покрытий на лезвия и т.д.

Следует отметить, что в связи с развитием машиностроения идет процесс сближения стандартов разных стран. Это касается не только терминов, но и соответствия обозначений обрабатываемых и инструментальных материалов, видов обработки резанием, типов режущих пластин и режущих инструментов. С точки зрения обработки резанием материалы заготовок подразделяются на три группы [5; 6]:

1) конструкционные стали, инструментальные стали, стали для отливок, коррозионно- и теплостойкие стали (мартенситно-ферритного класса);

2) коррозионно- и теплостойкие стали (аустенитного класса), жаростойкие и жаропрочные сплавы (мартенситно-аустенитного, мартенситного и аустенитного классов, на Ni-Cr основе), никель-кобальтовые сплавы, титановые сплавы (деформируемые, литейные);

3) чугуны (ковкие, серые, антифрикционные с шаровидным графитом), алюминиевые сплавы (деформируемые, литейные), магниевые сплавы (деформируемые, литейные), медь и медные сплавы (медь, латуни, бронзы), антифрикционные сплавы (цветные, алюминиевые, порошковые, баббиты).

Для каждой из этих групп обрабатываемых материалов установлены таблицы соответствия обозначений марок в различных странах: ГОСТ (Россия), DIN (Германия), SS (Швеция), BS (Великобритания), UNI (Италия), JIS (Япония), ANSI (США) [7].

Применяемые для обработки материалов заготовок инструментальные материалы подразделяются, например, как в [8], на следующие группы: 1) углеродистые стали; 2) углеродистые легированные стали; 3) быстрорежущие стали; 4) твердые сплавы; 5) минералокерамику и керметы; 6) сверхтвердые материалы. К инструментальным материалам предъявляется ряд требований, основными из которых являются [9]: высокая твердость, высокая теплостойкость, высокая прочность, высокая износостойкость, низкая физико-химическая активность по отношению к обрабатываемым материалам, высокая технологичность. В частности, твердые сплавы, в зависимости от обрабатываемого материала и согласно кодам ISO/ANSI подразделяются на три группы: P, M, K. Группы разбиты на подгруппы, каждая из которых обозначена числовым индексом, характеризующим вид обработки, режим резания и свойства обрабатываемого материала. Установлены диаграммы соответствия инструментального и обрабатываемого материалов в связи с режимом резания и характеристиками твердого сплава. Эти диаграммы позволяют рекомендовать предпочтительные области применения тех или иных подгрупп инструментальных материалов и дополняются картами характеристик и условий обработки поверхности и режимами резания.

Анализ типов режущих пластин. Исходя из деления режущих инструментов на цельные, составные и сборные, их режущие лезвия могут быть выполнены: 1) монолитными (заодно с державкой или корпусом); 2) с напайными, сварными, клееными и 3) со сменными режущими пластинами. Первый вариант применяется, как правило, для сложных и мелкоразмерных инструментов при недостаточном доступе к зоне резания, например, зуборезных или резьбонарезных. Второй вариант – в основном для удешевления конструкции инструмента. Наибольшее применение находит третий вариант исполнения режущего лезвия в связи со следующими преимуществами:

- повышение эксплуатационной стойкости инструмента на 25...30 % за счет отсутствия термических напряжений;
- повышение скорости резания;

- простая замена затупившихся режущих кромок;
- экономия дорогостоящих компонентов твердого сплава – вольфрама и кобальта. Возврат использованных сменных многогранных пластин составляет 90 %, в то время как напаянных – около 15 %;
- возможность многократного использования державок;
- применение износостойкого покрытия.

Этот вариант исполнения режущих пластин в своем развитии претерпел ряд изменений, существенно повлиявших на их форму, точность и т.д. В частности, в каталоге [6] приведена схема подразделения согласно действующим в Союзе Независимых Государств стандартам (рис. 1).

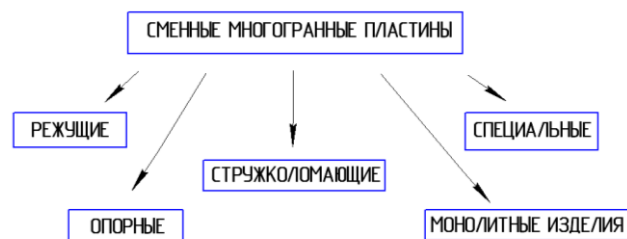


Рис. 1. Схема подразделения сменных многогранных режущих пластин

Режущие пластины применяются для оснащения: токарных проходных, расточных, подрезных, автоматных и специальных резцов; резцов, работающих по копиру; торцевых фрез (конструкция, размеры пластин и технические требования к ним по ГОСТ 19086, ГОСТ 27302). Опорные пластины могут быть трех-, четырех-, пяти-, шестигранными, круглыми, ромбическими и в виде параллелограмма (конструкция, размеры и технические требования по ГОСТ 19086). Стружколомающие пластины имеют конструкции, размеры и технические требования по ТУ 48-19-404-86. Монолитные изделия применяются для оснащения монолитного режущего инструмента (конструкция, размеры и технические требования по ТУ 48-19-66-90). Специальные пластины применяются для оснащения специальных резцов, предназначенных для обработки колесных пар вагонов и локомотивов, строгания и сверления железнодорожных рельсов.

Аналогичным образом режущие пластины подразделяются по форме в каталогах [7 – 9]. Пластины всех форм стандартизованы, каждой форме соответствует буквенное и цифровое обозначение в соответствии с ISO. Также пластины классифицируются по величине заднего угла, классу допуска, конструктивным особенностям, длине режущей кромки, толщине пластины, параметрам зачистной фаски и форме режущей кромки, как в [10].

Однако многие производители дополняют данные классификации, вводя различия между пластинами в типах используемых стружколомов и конструктивных особенностях. Например, фирма Tysontool [11] предлагает режущую пластину, которую по форме можно отнести к пластинам с ромбической формой, однако особенности конструкции и тип применяемых стружколомов требуют применения обозначения, не принятого в ISO (табл. 1, п. 1). В таблице 1, п. 2 представлена нестандартная режущая пластина фирмы Sumicarbide [12].

Фирма «Sandvik Coromant» предлагает систему инструментов CoroTurn TR [13]. Сущность системы заключается в специальном корпусе для опорной поверхности пластины, на которой изготавливаются ответные точно расположенные Т-образные выступы в горизонтальной и вертикальной плоскостях (табл. 1, п. 3). Именно они обеспечивают горизонтальную неподвижность пластины в базовом пазу инструмента. Тем самым исключается микроперемещение режущей пластины при чистовой токарной обработке.

Для фрезерования пазов и уступов предлагается новая пластина с восьмью режущими кромками [14], которая обеспечивает равномерное распределение припуска по всей поверхности (табл. 1, п. 4).

Нестандартные формы пластин предлагаются и другими фирмами, например «Iscar» [15]. Пластина в форме звездочки (табл. 1, п. 5) обеспечивает хороший доступ в зону обработки при отрезании заготовки.

Во многих пластинах с рельефной поверхностью реализуется принцип самозатачивания [16]. В этом случае сменные режущие пластины (табл. 1, п. 6) отличаются наличием специальной канавки вдоль режущей кромки, благодаря которой режущая кромка по мере износа самозатачивается.





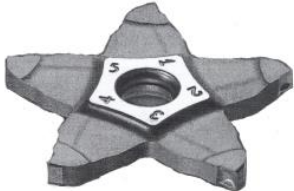

Изготовление пластин с рельефной передней поверхностью открыло новые возможности обработки резанием. Одно из направлений – new wave (новая волна) [17]. Эти пластины при повороте на грань обеспечивают разные передние углы.

Режущие пластины также классифицируют по видам обработки, например, токарной, фрезерной и расточной. Компания Mitsubishi [18] производит более 100 наименований режущих пластин применительно к различным видам обработки резанием. На выбор пластины влияют несколько факторов: материал обрабатываемой заготовки (сталь, чугун); состояние поверхности (с коркой, без корки и т.д.); вид обработки (черновая, получистовая, чистовая).

Многие фирмы не отказываются и от составных инструментов, которые просты в изготовлении, обеспечивают доступ в закрытые зоны обработки и обладают сравнительной дешевизной. Например, итальянская фирма IMPERO предлагает систему напайных инструментов, которые обеспечивают токарную обработку как наружных, так и внутренних поверхностей [19].

Таблица 1

Виды нестандартных режущих пластин

№ п/п	Вид режущей пластины	Фирма
1		Режущие пластины фирмы «Tysontool»
2		Режущие пластины фирмы «Sumicarbide»
3		Режущие пластины системы Coro Turn TR фирмы «Sandvik Coromant»
4		Режущие пластины для фрезерования пазов фирмы «Sandvik Coromant»
5		Режущие пластины фирмы «Iscar»
6		Элементы самозатачивающейся режущей кромки центра исследований и развития (г. Шенектэди, шт. Нью-Йорк) и фирмы General Electric (г. Детройт, шт. Мичиган)

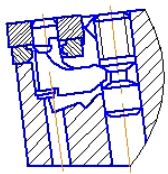
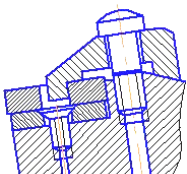
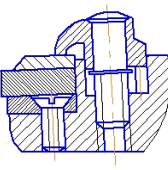
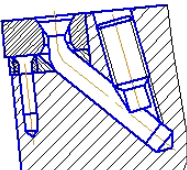
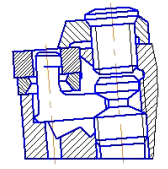
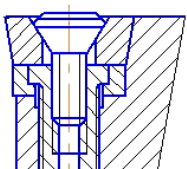
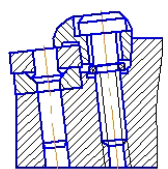
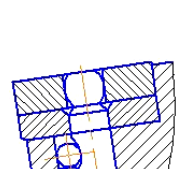
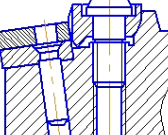
Таким образом, в эволюции формы пластин можно отметить постоянное ее усложнение. Вначале были пластины простых форм, без передних и задних углов, затем появились пластины с задними углами; далее начали выполнять канавки на передней поверхности пластины, эти канавки все время усложнялись и имеют в настоящее время рельеф, обеспечивающий как стружколомение, так и изменение передних углов в разных сечениях пластины при повороте ее на грань; вслед за этим появились пластины со специальным рельефом на основании для обеспечения надежного закрепления пластины. В итоге сегодня можно смоделировать и изготовить самую сложную пластину по конфигурации режущей кромки и форме передней и задней поверхностей и поверхности основания, а также форме отверстий (при необходимости) для ее закрепления.

Система обозначений державок, модулей и типов крепления режущих пластин. В модульных инструментальных системах используются унифицированные модули, в которых закрепляются режущие пластины. Эти модули имеют различные наименования (резцы-вставки, блоки, картриджи, кассеты), различную конфигурацию, а также различные типы механизмов крепления режущих пластин.

В соответствии с ISO 5608-80 и СТ СЭВ 4599-84 ГОСТ 26476-85 [20] устанавливает условные обозначения токарных резцов и регулируемых резцов-вставок с механическим креплением режущих сменных многогранных пластин. Обозначение резцов состоит из символов. Допускается включать в условное обозначение дополнительный символ, состоящий максимум из трех букв или цифр, который должен быть отделен от символа на 10 месте знаком тире и не должен быть идентичным ему. Система ISO устанавливает пять основных типов крепления режущих пластин (C, D, P, S, M) и несколько дополнительных для обеспечения большей жесткости соединения. Примеры типов крепления режущей пластины представлены в таблице 2 [21].

Таблица 2

Типы крепления режущей пластины

Эскиз крепления	Тип крепления	Символьное обозначение	Эскиз крепления	Тип крепления	Символьное обозначение
	Рычаг	P		Прихват повышенной жесткости в отверстие	D
	Прихват	C		Тяга	P (P – дополнительное обозначение)
	Рычаг, прихват, для тяжелых условий резания	G		Винт	S
	Клин, прихват	M		Качающийся штифт	P (S – дополнительное обозначение)
	Клин	P (W – дополнительное обозначение)			

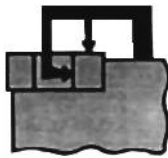


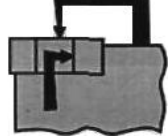
Схематическое изображение существующих типов крепления режущих пластин с указанием направления действия силы зажима представлено в таблице 3 [22].

Шведской фирмой Sandvik созданы отрезные резцы Q-Cut с системой фиксации режущей пластины путем заклинивания, отличающиеся повышенной жесткостью [23]. Эта система крепления и исполнение режущей пластины являются прообразом позднее появившейся формы режущей пластины с впадинами на основании (см. табл. 1, п. 3). Горизонтальная составляющая силы резания воспринимается упором, а положение режущей пластины определяется базированием по трем точкам. Две V-образные опорные поверхности исключают боковое смещение режущей пластины, что позволяет осуществлять

продольное точение (например, для перепрофилирования канавок). Такая система крепления гарантирует воспроизводимость позиционирования режущей пластины с точностью порядка 0,03 мм.

Таблица 3

Схемы крепления режущей пластины

Схема крепления	Наименование крепления	Символьное обозначение
	Прижим сверху (прихват)	C
	Прижим повышенной жесткости (RC) (прихватом в отверстии)	D
	Поджим в отверстие (рычаг, тяга, клин)	P
	Крепление винтом (винт с торoidalной головкой, винт-эксцентрик)	S
	Прижим сверху и поджим в отверстие (клин-прихват)	M

Система резцов, выпускаемых фирмой Iscar Hartmetal GmbH (ФРГ) имеет особый способ крепления сменных режущих пластин в пружинящем гнезде державки [24]. Резцы с таким креплением, выпускаемые под торговой маркой «Cut-Grip», можно применять для продольного точения, обработки канавок, выборки выемок, копировальной обработки, обработки канавок на торцах, снятия фасок, обработки внутренних канавок и выточек, отрезки, а при использовании специальных пластин и для нарезания резьбы (рис. 2, а). Такая универсальность инструмента обеспечивается прежде всего конструкцией пластины, имеющей с двух сторон призматические углубления. На рисунке 2, б показана конструкция гнезда под пластину, для которой характерно наличие двойной призмы и жесткого упора. На рисунке 2, в приведена конструкция сменной головки (адаптер), которая крепится в гнезде державки двумя винтами; третий винт служит для закрепления режущей пластины путем деформации верхней части адаптера.

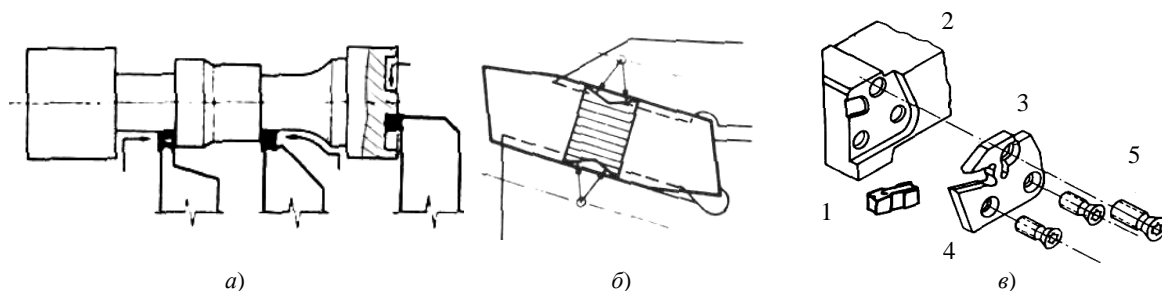


Рис. 2. Системы крепления «Cut Grip»:

а – пример использования при токарной обработке;

б – схема крепления режущей пластины в гнезде державки;

в – сменная головка, крепящаяся на державке;

1 – режущая пластина; 2 – державка; 3 – адаптер; 4 – винт крепления; 5 – зажимной винт

Резцы-вставки фирмы Sandvik Coromant [21], отвечающие требованиям стандартов ISO, выпускают в разных исполнениях для режущих пластин с задним углом и без него.

Характерные особенности представлены в таблице 4:

- имеются в исполнениях T-MAX P с рычажным механизмом крепления пластины винтом и T-MAX S с Г-образным прихватом;

- полностью взаимозаменяемы. Эти резцы-вставки подходят ко всем инструментам, изготовленным согласно стандартам ISO;

- имеют радиальную и осевую настройку.

Рычажный механизм T-MAX P, который позволяет использовать любые пластины T-MAX P без заднего угла; эффективный передний угол можно изменять в пределах от -6° до $+18^\circ$ выбором из широкого ассортимента геометрий T-MAX P; жёсткое крепление рычажным механизмом обеспечивает беспрепятственное течение стружки по передней поверхности пластины; резьбовое отверстие и штифт рычага находятся вне критической зоны интенсивного нагрева; гнездо с двумя стенками обеспечивает максимальную опорную поверхность пластины и повышает точность её установки при индексации (т.е. при её раскреплении, повороте для смены режущей кромки и повторной установке). Винт рычага доступен сверху и снизу инструмента (табл. 4, п. 1, а).

Винтовой механизм T-MAX U обеспечивает беспрепятственный сход стружки, малое число деталей, малые габариты. Преимущество механизма крепления с винтом It-Lock состоит в быстрой индексации пластины или ее смене без удаления винта с меньшим риском потери последнего (табл. 4, п. 1, б).

Г-образный прихват T-MAX S (табл. 4, п. 1, в, г) – это малогабаритный и простой механизм крепления, состоящий из прихвата и винта с пружинным стопорным кольцом, поднимающим прихват при отвёртывании винта; сконструирован для применения с пластинами T-MAX S, оснащёнными стружколомающими канавками; возможно использование пластин T-MAX без стружечных канавок, а в сочетании с другим прихватом возможно также применение накладных стружколомов. Сменные резцовые насадки T-MAX могут выполняться другой конфигурации и с различными механизмами зажима пластины (табл. 4, п. 2).

Зачистной блок для торцовых и угловых фрез осевой установки имеет форму, показанную в таблице 4, п. 3.

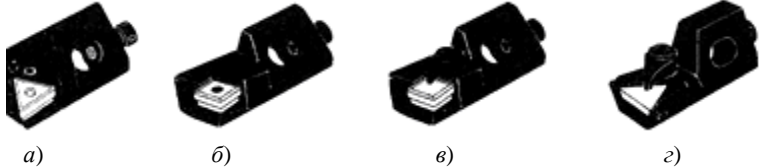
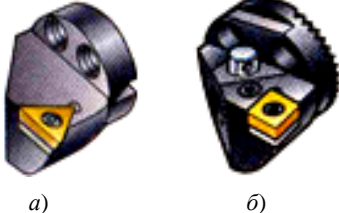
Резцы-вставки ISO имеют разные формы и механизм крепления в них режущих пластин и у других фирм [25 – 29]. Вид некоторых резцов-вставок представлен в таблице 4, п. 4. В одних и тех же картриджах могут использоваться режущие пластины различных форм (табл. 4, п. 5) [30].

Фирма «Hertel» (Германия) [31] предлагает расточные блоки для крепления пластин различных форм (табл. 4, п. 6). Возможно использование пластин различной формы и применение различных типов крепления (табл. 4, п. 7), как предлагает фирма «Kennametal» [32].


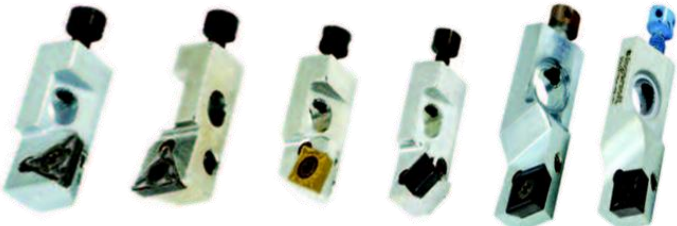


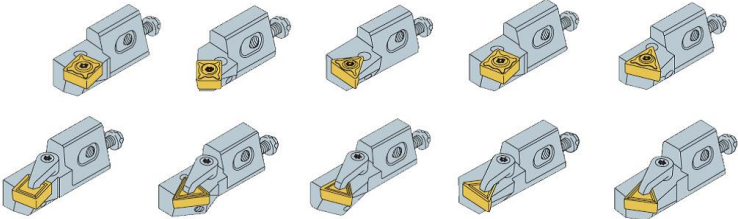
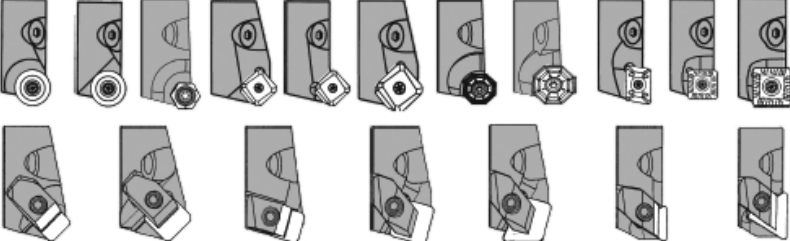
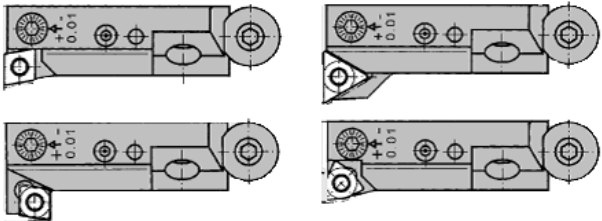
Фирма «Komet» [33] использует в инструментах для обработки отверстий модули самой различной конфигурации (табл. 5). Причем в различных типах инструментов могут использоваться как одиночные модули (поз. 2.1 и 3.1, 2.2 и 3.2 в табл. 5), так и разные модули (остальные позиции в табл. 5). В одном и том же инструменте могут использоваться различные модули (поз. 2.1 и 2.2, 3.1 и 3.2 в таблице 5).

Таблица 4

Виды инструментальных модулей зарубежных фирм

№ п/п	Вид инструментальных модулей	Наименование модуля и фирмы
1	 <p>а) б) в) г)</p>	Резцы-вставки T-MAX: а – исполнение T-MAX P; б – исполнение T-MAX U; в – исполнение T-MAX S; г – исполнение T-MAX AL, фирмы «Sandvik Coromant»
2	 <p>а) б)</p>	Резцовые насадки T-MAX: а – для треугольных пластин; б – для ромбических пластин, фирмы «Sandvik Coromant»

Продолжение таблицы 4

№ п/п	Вид инструментальных модулей	Наименование модуля и фирмы
3		Зачистной блок для фрез фирмы «Sandvik Coromant»
4		Резцы-вставки фирмы Ingersoll
5		Резцы-вставки фирмы Hollfelder
6		Резцы-вставки фирмы Rigibore
7		Картриджи фирмы Korloy
8		Картриджи, используемые фирмой Widia
9		Пример использования картриджей одного типоразмера для закрепления пластин разной формы фирмы Johne & Co

Окончание таблицы 4

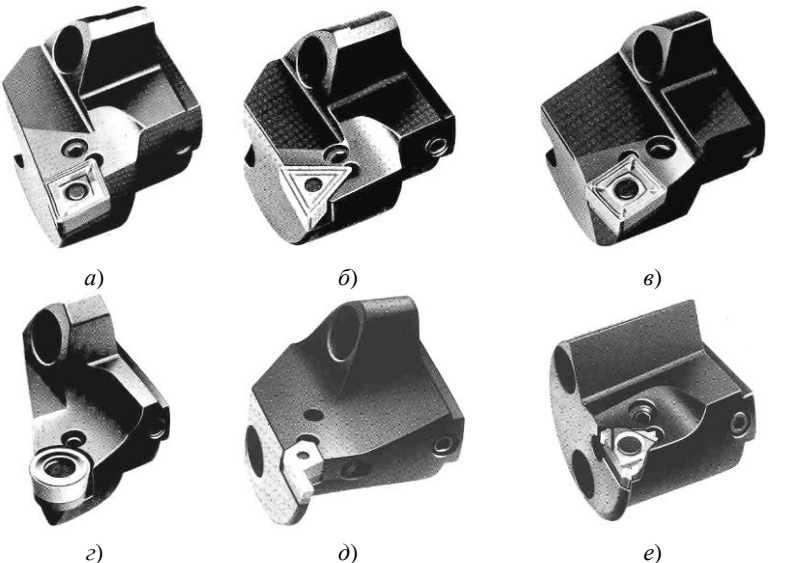
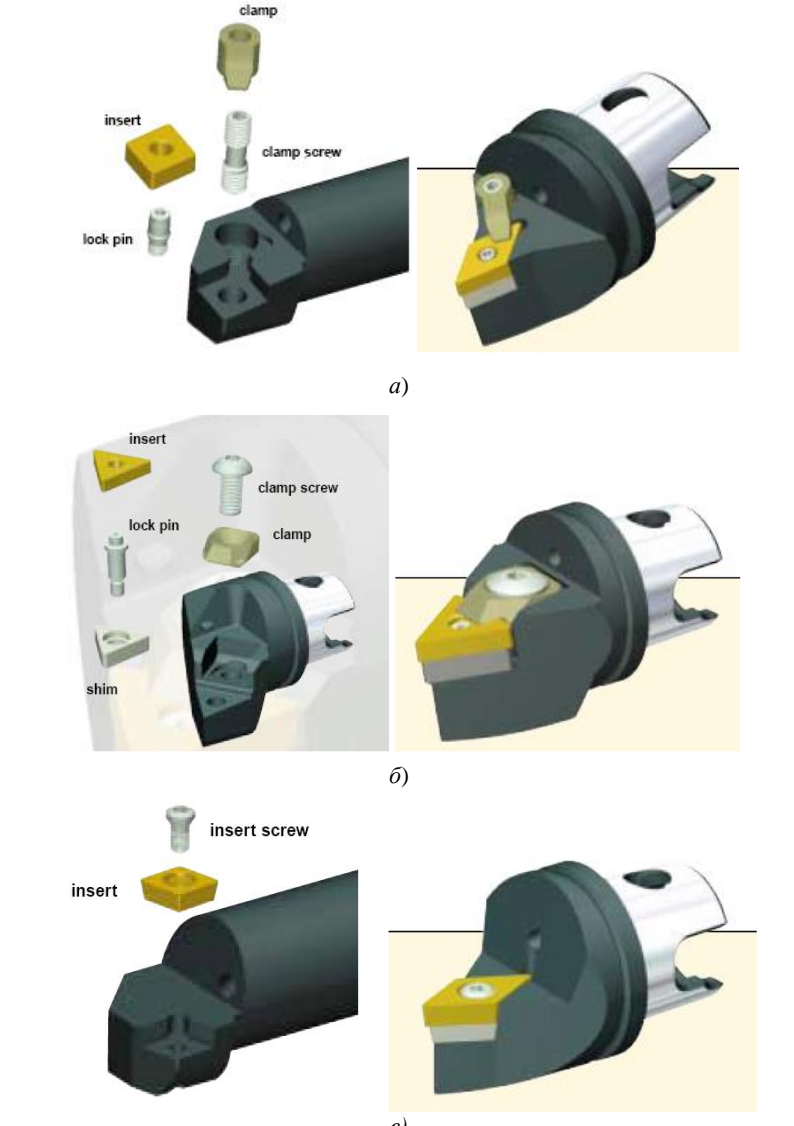
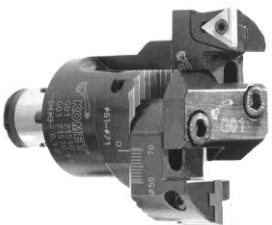


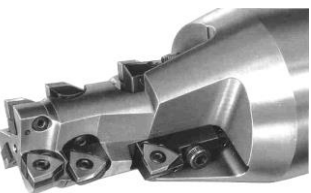

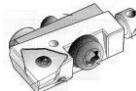
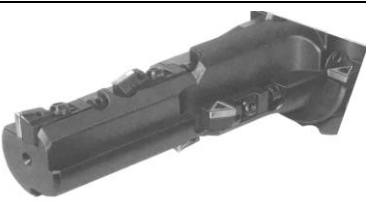

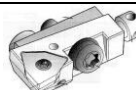




№ п/п	Вид инструментальных модулей	Наименование модуля и фирмы
10	 <p>а) б) в) г) д) е)</p>	<p>Расточные блоки для крепления пластин различных форм: <i>a</i> – ромбической; <i>б</i> – треугольной; <i>в</i> – квадратной; <i>г</i> – круглой; <i>д</i> – для точения внутренних канавок; <i>е</i> – для нарезания резьб, фирмы «Hertell»</p>
11	 <p>а) б) в)</p>	<p>Блоки с различными типами крепления: <i>a</i> – тип крепления С; <i>б</i> – тип крепления М; <i>в</i> – тип крепления S, фирмы «Kennametal»</p>

Таблица 5

Режущий инструмент фирмы «Комет» для обработки отверстий

№ п/п	Вид режущего инструмента	Используемые модули	
1		1.1	
		1.2	
2		2.1	
		2.2	
3		3.1	
		3.2	
4		4.1	
5		5.1	

Предлагается также использовать пластины для напайных резцов [34], например, по ГОСТ 25395 в сборном режущем инструменте (рис. 3).

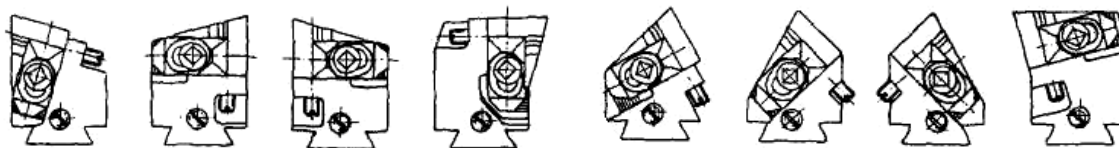


Рис. 3. Резцовые блоки с креплением режущих пластин без отверстия

В этом случае применяется система крепления пластин без отверстия, но с рациональным с точки зрения закрепления использованием угла наклона поверхностей пластин и преимуществ закрепления пластин прихватом. При этом предусмотрена регулировка (выдвижение) режущей пластины на размер по мере ее износа. Блок резцовый может быть вставлен в разные типы режущих инструментов – проходные, подрезные, левые и правые резцы, посредством соединения типа «ласточкин хвост».

Продолжение статьи в следующем номере журнала «Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки». 2012. № 11.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка резанием, термины, определения и обозначения общих понятий: ГОСТ 25762. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1983. – 41 с.

2. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий: ГОСТ 25761. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1983. – 6 с.
3. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий: ГОСТ 25751. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1983. – 24 с.
4. Шварц, В.В. Иллюстрированный словарь по машиностроению: англо-немецко-французско-испанско-русский: 3614 терминов / В.В. Шварц. – М.: Рус. яз., 1986. – 428 с.
5. Твердосплавные пластины: каталог Sandvik – МКТС. – 2006. – 40 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.Coromant.Sandvik.com.ru>.
6. Пластины сменные многогранные твердосплавные: каталог / Кировградский завод твердых сплавов, 2002. – 52 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kzts.ru>.
7. Гречишников, В.А. Проектирование инструментов: учеб. пособие / В.А. Гречишников, И.А. Коротков, А.Т. Схиртладзе. – М.: Славянская школа, 2006. – 253 с.
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.info.instrumentmr.ru/instrum_material.html.
9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.Avteh.com.ua/zcc/tverd_plastin/obshie_svedeniya.htm.
10. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cermet.spb.ru>.
11. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tysonstool.com>.
12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sumicarbide.com>.
13. Metallworking World. Деловой и технический журнал от Sandvik Coromant. – 2003. – № 1. – С. 34 – 35.
14. Metallworking World. Деловой и технический журнал от Sandvik Coromant. – 2006. – № 3. – С. 12 – 13.
15. New magic from ISCAR. New products catalog. Metric version 2.0, 2007.
16. Tech. Briefs. Tooling Production. – 1984. – № 10, V 49. – P. 104 – 105. Самозатачивающиеся режущие пластины // Режущий инструмент: экспресс-инфор. / НИИмаш. – М., 1984. – Вып. 13. – С. 9 – 10.
17. RotatingTools and Inserts: каталог Sandvik Coromant, 1991. – 528 с.
18. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mitsubishicarbide.com>.
19. Impero System. Brazed and HSS Tools for Lathes: каталог, 2000. – 51 с.
20. Резцы токарные и резцы-вставки с механическим креплением сменных многогранных пластин: ГОСТ 26476. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 6 с.
21. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.coromant.sandvik.com>.
22. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spinstrument.ru/pdf/04.pdf>.
23. Lauvige, O. Sandvik actualise le tronconnage / O. Lauvige // Machine modern. – 1987. – № 916. – P. 39.
24. Fürstn, P. Drehroerkzeugaystem mit breitem Anwendungs-bereich: Nebenzeiten werden stark verringert / P. Fürstn // Schroeizer Maschinenmarkt. – 1988. – № 6. – S. 34, 35, 37.
25. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ingersoll.com>.
26. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hollfelder-cuttingtools.de>.
27. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rigibore.com>.
28. Karloy cutting tools: каталог, 2006.
29. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.widia.com/widia/en/pdf/Widia_ESP_INCH_230-329.pdf.
30. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.johne-co.de>.
31. Локтев, А. Кеннаметал – Хертлер А.Г. Обзор производственной программы / А. Локтев, А.П. Меркулов. – М., 1995. – 62 с.
32. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kennametal.com/en/pdf_library/pdf_library_section.jhtm.
33. Comet: каталог, 2002. – 3/10, 4/02.
34. Новоселов, Ю.А. Универсализация сборных токарных резцов / Ю.А. Новоселов // Вестн. машиностроения. – 2006. – № 1. – С. 56 – 58.

Поступила 18.01.2012

TRENDS ANALYSIS OF TOOL-IN-HAND SYSTEM DESIGN ENGINEERING
Part 1. TERMS AND DESIGNATION SYSTEMS OF CUTTER PLATES,
HOLDERS AND MODULES

N. POPOK

Key problems of the design engineering and production of cutting tools at home-produced mechanical-engineering enterprises are formulated. Equivalent terms for cutting work and material designation are considered. Analysis of cutter plate types, cutter block and their holding in instrumental module is carried out, constructional features of tool-in-hand system, including ones for multipurpose treatment are evolved. Example system for turning cut, parting, milling, bore operation are given, general trends in modern development instrument provision of mechanical-engineering enterprises are disclosed.

УДК 621.793

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТАЛИ В ВОДОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ

канд. техн. наук А.А. ШМАТОВ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Исследованы структура и свойства стальной поверхности, подвергнутой термогидрохимической обработке в вододисперсной среде на основе оксидов $TiO_2 + MoO_3$. Процесс термогидрохимической обработки включает: 1) химическую обработку поверхности в специальной вододисперсной среде; 2) термообработку. В результате оптимизации процесса ТГХО коэффициент трения стальной поверхности снизился в 8,3 раза. Разработанная технология позволяет повысить стойкость стальных инструментов и изделий в 1,3... 4,5 раза по сравнению с традиционными.

Введение. Проблема повышения износостойкости стальных инструментов и деталей машин, по-прежнему, остается актуальной. Решить ее можно путем модифицирования стали тугоплавкими соединениями различными методами обработки. Наибольший научный и практический интерес в этом плане представляет процесс термогидрохимической обработки (ТГХО) стали в вододисперсной среде, поскольку применим для готовых к эксплуатации изделий, не изменяет их первоначальные размеры, форму и структуру [1 – 5]. Согласно настоящим представлениям в области трения и изнашивания [6 – 8], лучшими антифрикционными свойствами в атмосферных условиях обладают материалы и покрытия на основе сульфидов и оксидов. Однако предпочтение при разработке покрытий отдается оксидам, поскольку они являются постоянной составляющей граничного слоя, образующегося при трении любого материала. При формировании оксидной пленки определенного состава и структуры можно создать поверхностное упрочнение (эффект Роско) и снизить сопротивление сдвигу при трении (эффект Ребиндера, Берналла и др.); причем эффект Ребиндера реализуется только в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ). Согласно молекулярно-механической теории трения повышение износостойкости изделия можно достичь при выполнении двух основных условий: при высокой твердости поверхности стали (покрытия) и низкой ее прочности адгезионной связи с контактирующим материалом в зоне трения.

Как известно [6 – 10], материалы и покрытия обладают твердосмазочными свойствами в тех случаях, когда: а) имеют слоистую поликристаллическую структуру (графит, сульфиды); б) сформированы на основе наноструктурированных материалов; в) реализуется теория Берналла, согласно которой твердое тело приобретает свойства жидкости, если в кристаллической решетке содержится более 10 % вакансий; г) реализуется эффект Ребиндера, который ведет к пластифицированию поверхностного слоя и созданию положительного градиента механических свойств в зоне трения; д) реализуется эффект Киркинда, который приводит к селективному растворению из сплава легирующих элементов из-за различия их электрохимических потенциалов, в результате чего формируется квазижидкая пленка, снижающая коэффициент трения и фрикционный разогрев.

Среди указанных способов следует выделить методы обработки стали, которые позволяют сформировать наноструктуру на основе тугоплавких и сверхтвердых материалов [1 – 5; 11]. Наноструктурированные материалы и покрытия облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в то же время твердость наноматериалов из металлов и тугоплавких соединений возрастает 2...3 раза [10]. Именно покрытия, сформированные методом термогидрохимической обработки, имеют наноструктуру и обладают сверхпластичностью [1 – 5]. В условиях интенсивной эксплуатации инструментов и деталей машин, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения коэффициента трения является нанесение твердосмазочных покрытий на рабочие части изделий, что гарантирует их длительную работу. Термогидрохимическая обработка является наиболее простым и универсальным методом. С помощью этого метода можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, других антифрикционных материалов и их композиций [1 – 5].

Из приведенного анализа следует, что процесс ТГХО имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для инструментов и деталей машин, имеющих малый ресурс работы. Однако вопросы, связанные с термогидрохимической обработкой практически всех инструментальных и конструкционных сталей, мало изучены.

В настоящей работе поставлены задачи: 1) сравнить триботехнические свойства стальной поверхности, подвергнутой ТГХО в вододисперсной среде на основе оксидов и их композиций; 2) оптимизировать процесс ТГХО стали; 3) изучить структуру и закономерности формирования оптимизированных покрытий на стали; 4) оценить уровень напряженного состояния и глубину модифицированного слоя в стали, подвергнутой ТГХО; 5) апробировать разработанный процесс ТГХО в промышленности.

Объекты и методика исследований. Все исследования проведены на углеродистой инструментальной стали У8 (0,8 % С), которую подвергали термогидрохимической обработке. Сам процесс ТГХО осуществляли в 2 этапа: а) путем химической обработки (ХО) поверхности при температуре 95...100 °С в течение 40...120 минут в специально приготовленной вододисперсной среде на базе наноразмерных порошков тугоплавких материалов; б) последующей термической обработки (ТО), включающей нагрев до температуры 130...1050 °С, выдержку в течение 30...60 минут и охлаждение. Насыщающую вододисперсную среду предварительно готовили по специальной технологии диспергирования до наноуровня грубодисперсных частиц (размером не более 5 мкм) тугоплавких соединений (оксидов) и других материалов с добавлением 5 %-ного водорастворимого поверхностно-активного вещества (сульфанола). Готовым считался рабочий состав с кислотностью РН 6...8, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH₄ОН. При проведении химической обработки образцы помещали и выдерживали в ванне с готовым составом водной насыщающей среды, нагретой до температуры процесса. Поверхность образцов предварительно обезжиривали и декапировали в 5 %-ном растворе серной кислоты в течение 1...2 минут. После каждой операции подготовки и химической обработки образцы промывали в воде. Изотермическую выдержку стали проводили в воздушной среде до 250 °С, выше этой температуры – под слоем флюса SnCl₂ или плавкого затвора В₂О₃.

Для изучения структуры стали, подвергнутой термогидрохимической обработке, применяли микроструктурный, рентгеноструктурный, микрорентгеноспектральный анализы. Тонкую структуру и морфологию поверхности исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) «Nanoscope 3D» (Veeco, USA). Рентгеновские съемки стальной поверхности выполнялись на дифрактометре ДРОН-3.0 в режиме сканирования по точкам в монохроматизированном CuK_α-излучении. Расчет макронапряжений в стали осуществляли по методике одной съемки, как сумму главных напряжений σ_1 , σ_2 по формуле [12; 13]:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -E/\mu [(d_{\perp} - d_0)/d_0],$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; d_0 – межплоскостное расстояние для ненапряженного материала; d_{\perp} – среднее межплоскостное расстояние для напряженного материала в направлении, перпендикулярном к поверхности образца.

Триботехнические свойства стальной поверхности исследовали на микротрибометре возвратно-поступательного типа (ИММС, г. Гомель) по схеме «подвижный шарик – неподвижная плоскость» при следующих условиях испытаний: нагрузка 1 Н; длина трека 3 мм, скорость 4 мм/с; пара трения: упрочненная сталь (плоскость) – сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) [4; 5]. Показатель относительной стойкости упрочненного инструмента (или детали) определяли по формуле $K_w = t_2/t_1$, где t_1 – время работы (длина рабочего хода) исходного инструмента; t_2 – время работы упрочненного инструмента.

Результаты исследований. Процесс термогидрохимической обработки имеет двойственный характер упрочнения: 1) на поверхности стали осаждается наноструктурированное твердосмазочное тугоплавкое покрытие; 2) в подслое создается модифицированная зона с высокими напряжениями сжатия.

Полученные покрытия на сталях имеют малую толщину (200...500 нм). Это ограничивает число методов, с помощью которых можно изучить свойства термогидрохимических тонкопленочных покрытий. Для наноструктурированных покрытий широко применяют методы исследования триботехнических характеристик, определяющей из которых является коэффициент трения [7; 8; 11].

Триботехнические исследования. Полученные твердосмазочные покрытия благодаря формированию нанокристаллической структуры обладают сверхпластичными свойствами. Результаты (рис. 1, 2) сравнительных трибологических испытаний поверхности стали У8, подвергнутой 2-часовой химической обработке (без термообработки) позволили сделать заключение, что в условиях сухого трения скольжения и воздушной атмосферы увеличение числа компонентов из тугоплавких антифрикционных материалов в составе вододисперсной насыщающей среды ведет к снижению коэффициента трения осажденных твердосмазочных покрытий. Процесс ТГХО может стать наиболее простым способом целенаправленного повышения износостойкости готовых изделий и изначально важно сформировать на поверхности сталей многокомпонентные, а не однокомпонентные оксидосодержащие покрытия.

На основании оптимизации и компьютерного проектирования процесса ТГХО стали У8 с помощью синтез-технологий определены технически оптимальные режимы и составы вододисперсных оксидных сред [4]. Обработка стали У8 по оптимальному режиму (ХО, 1 ч в составе TiO₂ + MoO₃, затем ТО при 200 °С, 0,5 ч) позволила существенно (в 8,3 раза) снизить коэффициент трения поверхности при сухом трении скольжения, по сравнению с исходным состоянием (рис. 3). Для инструмента, у которого место контакта с деталью меняется со временем (приработка не идет в одной точке) [14] важно на протяжении всего времени эксплуатации иметь не только минимальные, но неизменные значения коэффициента трения; этим требованиям отвечают термогидрохимические покрытия. Они имеют преимущества перед PVD алмазным покрытием (рис. 3) и другими твердосмазочными покрытиями [11], у которых сна-

чала коэффициент трения высокий, а затем он медленно снижается по мере приработки покрытий с кон-тртелом, причем с большой амплитудой колебаний.

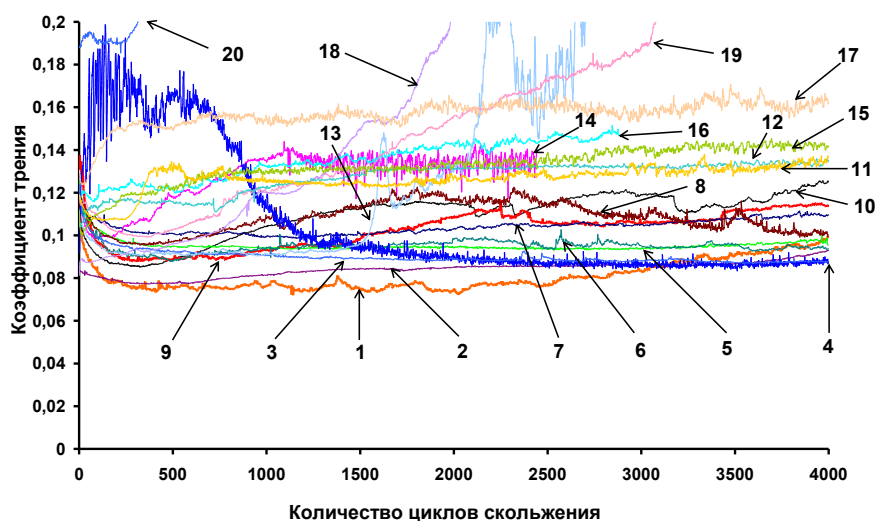


Рис. 1. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания ГХ покрытий на основе однокомпонентных оксидов при сухом трении скольжения:
1 – SnO; 2 – MnO₂; 3 – SiO₂; 4 – PbO; 5 – Co₃O₄; 6 – NiO; 7 – Al₂O₃; 8 – MoO₃; 9 – ZnO; 10 – SbO₃; 11 – V₂O₄; 12 – Bi₂O₄; 13 – B₂O₃; 14 – BeO; 15 – ZrO₂; 16 – Fe₃O₄; 17 – Cr₂O₃; 18 – WO₃; 19 – TiO₂; 20 – CuO

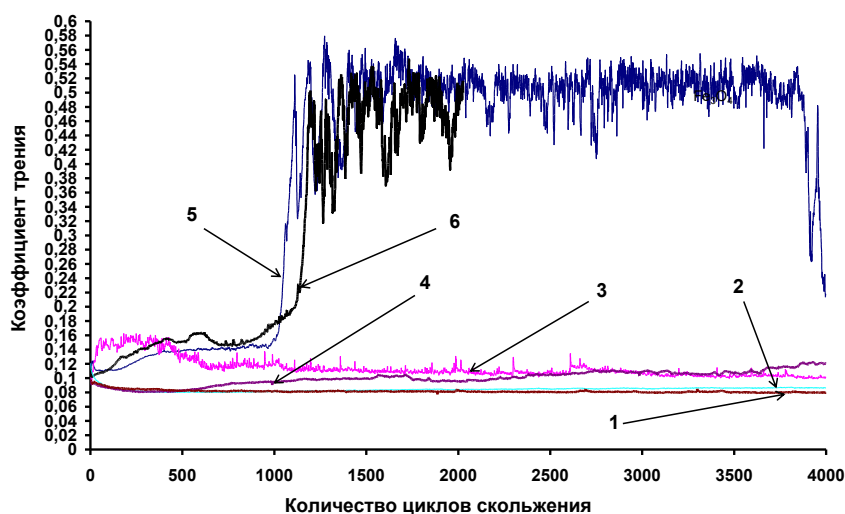


Рис. 2. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания ГХ покрытий на основе однокомпонентных углеродных (а) и многокомпонентных тугоплавких материалов (б) при сухом трении скольжения:
1 – MoO₃ + TiO₂ + ультрадисперсного алмаза (УДА); 2 – PbO + SnO + графита карандашного (ГК); 3 – PbO + SnO; 4 – MoO₃ + TiO₂; 5 – ZnO + SnO; 6 – ZnO + SnO + графита ГК

При дальнейшем исследовании триботехнических свойств выявлена важная эксплуатационная особенность разработанных покрытий. Термогидрохимические оксидные покрытия отличаются от ныне известных наноструктурированных покрытий [10; 11] более высокой термической стабильностью: даже после нагрева до 1050 °С и выдержки в течение 0,5 ч полученные покрытия сохраняют очень низкий ($f = 0,09$) коэффициент трения (рис. 4). Антифрикционные свойства поверхности определяются ее химическим составом, морфологией строения, микрорельефом, структурой, напряженным состоянием и другими факторами.

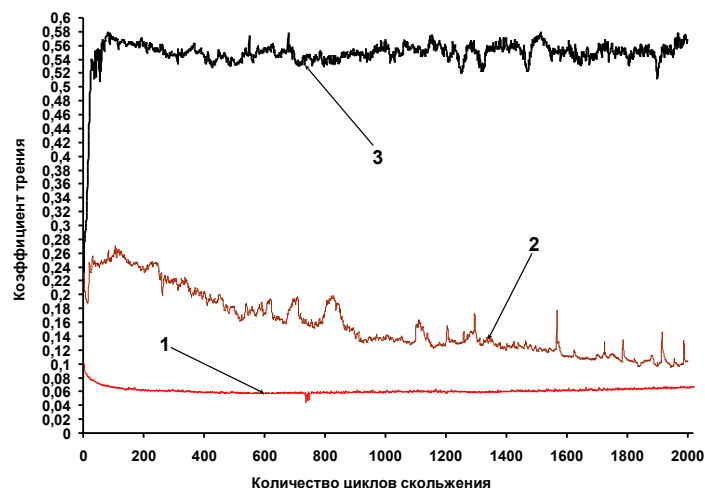


Рис. 3. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения от длительности изнашивания (без смазки) поверхности стали У8 до и после ТГХО:
1 – сталь У8 после ТГХО в оптимальном режиме;
2 – сталь У8 с алмазоподобным PVD покрытием; 3 – исходная сталь У8 (без обработки)

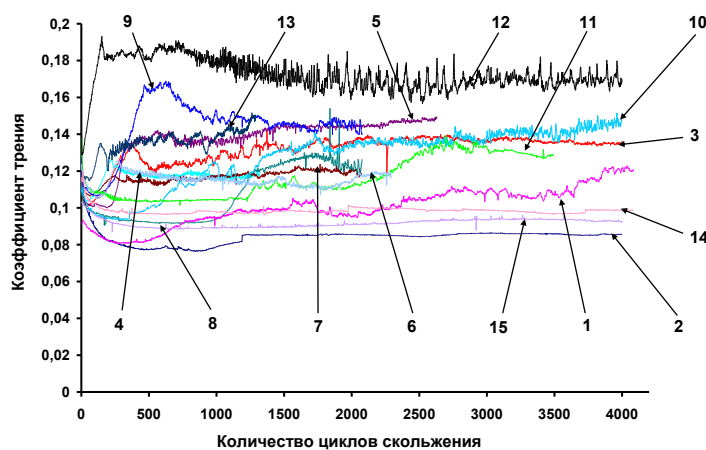


Рис. 4. Влияние температуры термообработки при ТГХО стали У8 на коэффициент трения при сухом трении скольжения (режим ХО: $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau = 2\text{ ч}$; состав водной среды на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$):
1 – $100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – $200\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 – $350\text{ }^{\circ}\text{C}$; 6 – $400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 7 – $450\text{ }^{\circ}\text{C}$; 8 – $500\text{ }^{\circ}\text{C}$;
9 – $550\text{ }^{\circ}\text{C}$; 10 – $600\text{ }^{\circ}\text{C}$; 11 – $650\text{ }^{\circ}\text{C}$; 12 – $700\text{ }^{\circ}\text{C}$; 13 – $870\text{ }^{\circ}\text{C}$; 14 – $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$; 15 – $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$

Структурные исследования в данной работе были проведены на стальных образцах, упроченных ТГХО в оптимальных вододисперсных средах на основе оксидов титана и молибдена. С помощью атомно-силового микроскопа «Nanoscope 3D» изучена морфология и кинетика формирования наноструктурированных слоев сначала в результате гидрохимической обработки стали У8 в дисперсном составе на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$, а затем после нагрева до температур от 100 до $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термогидрохимические покрытия на стали У8 имеют сложную структуру поверхности (рис. 5), состоящую из неоднородных по цвету и форме зерен. Все полученные покрытия формируются с нано- или нанокомпозитной структурой. Первоначально в вододисперсной среде на поверхности стали осаждаются зародыши размером 16 нм ; с увеличением времени химической обработки эти частицы заполняют поверхность, а затем и пространство, незначительно меняя свои размеры (табл. 1). В результате по принципу «свободного падения апельсинов (кластеров)» [15] на подложке формируются высокоорганизованные пленки с сильно развитой зернограничной поверхностью. Скорость роста гидрохимических слоев на стали составляет около 200 нм/ч . При касании отдельных наноразмерных частиц иглой микрозонда АСМ сканируются белые размытые строчки (рис. 5, а), что свидетельствует о подвижности этих частиц, их слабой связи с поверхностью и другими кристаллитами. Последнее указывает на твердосмазочные свойства гидрохимически полученных покрытий и находит объяснение в том, что наноматериалы по своей природе обладают сверхпластичностью [10].

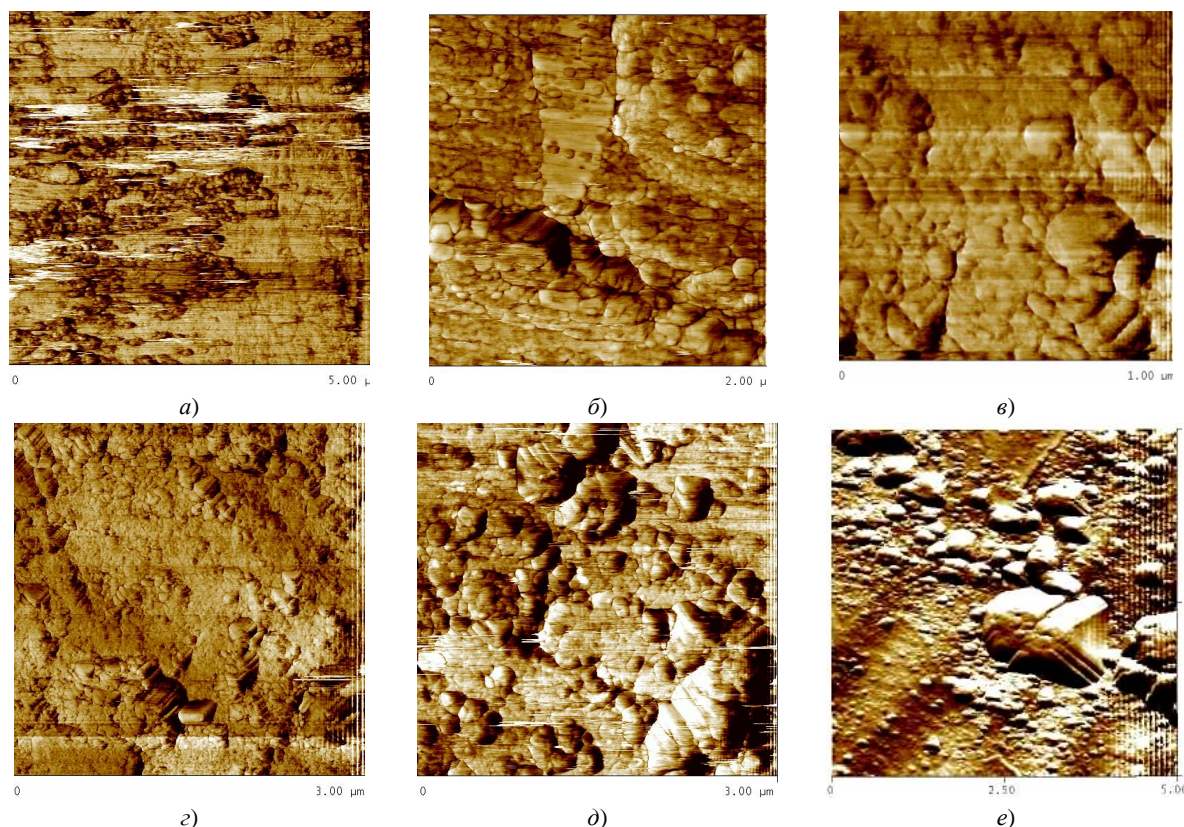


Рис. 5. Структура поверхности стали У8 после гидрохимической обработки в течение 10 мин (а), 30 мин (б), 1 ч (в, с), 2 ч (д) и термогидрохимической обработки при нагреве до 1000 °С (е) (состав вододисперсной среды – оптимальный на основе $TiO_2 + MoO_3$)

Таблица 1

Влияние параметров ТГХО стали У8 на размер зерен в покрытии

Время химического осаждения ГХ покрытия, мин		10			30			60			120	
Размер зерен в покрытии, нм		16			24			25			35	
Температура нагрева покрытия, °С	100	150	250	300	400	500	600	700	800	870	1000	
Размер зерен в покрытии, нм	25...30	30...34	90...95	90...95	90...97	90...100	95...110	110...120	90...100	90...110	90...205	

При последующем нагреве стали У8 размер зерен в полученных ГХ покрытиях с повышением температуры увеличивается (см. табл. 1); при этом сначала преобладает наноразмерная структура слоев, а выше 500 °С формируется нанокомпозитная структура, в которой появляются отдельные зерна (размером более 100 нм). Отмеченные ранее высокие антифрикционные свойства покрытий на стали после высокотемпературного нагрева до 1050 °С обусловлены формированием такой композиционной (нанополикристаллической) структуры, в которой оптимально сочетаются размеры и количество нано- и поликристаллических зерен.

О высокой модифицирующей способности вододисперсных химических составов свидетельствует большая толщина (800...900 мкм) зоны воздействия ГХО на стальной материал, в котором структура приобретает размытый серый цвет (рис. 6). На глубине до 200 мкм по границам зерен осаждаются отдельные дисперсные частицы. По-видимому, эти частицы образовались в результате коагуляции разряженных мицелл на базе оксидов и ПАВ, которые проникли в сталь по границам зерен в условиях значительного химического градиента и циклической парожидкой трансформации пересыщенного водного раствора. Покрытие на рис. 6 практически не различимо, поскольку его толщина (не более 200 нм) меньше разрешающей способности оптического микроскопа.

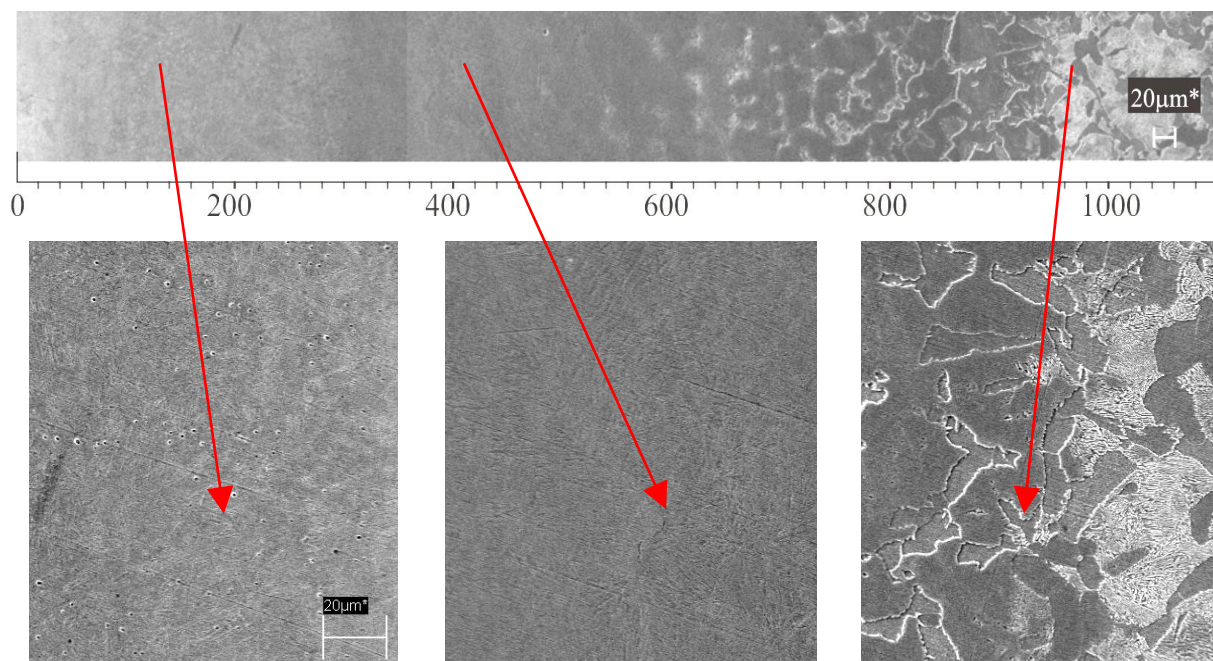


Рис. 6. Панорамная микроструктура поперечного среза стали У8, оптимально упрочненной ТГХО в оксидной Ti–Mo суспензии (слева – поверхность, справа – сердцевина)

Напряженное состояние. Рентгеноструктурные исследования (табл. 2) показали, что в результате ТГХО в поверхностной зоне модифицированной стали У8 (HRC 60) создаются остаточные сжимающие макронапряжения (1-го рода), наличие которых установлено по смещению линий на рентгенограммах. Величина макронапряжений сжатия возрастает в 1,7 раза по сравнению с необработанной сталью и сравнима с уровнем напряжений, специально создаваемых методами пластической деформации (ППД, МППД и др.) [16; 17]. При ППД путем холодной пластической деформации увеличивается плотность дислокаций до $10^{10} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [18; 19], в то время как при ТГХО по сравнению с исходным состоянием число дислокаций существенно не меняется (табл. 2).

Таблица 2

Результаты рентгеновской съемки стали У8

Режим обработки стали	Фаза (линия)	$2\theta_{\perp}$, град	$2\theta_0$, град	d_{\perp} , нм	d_0 , нм	σ , МПа	Плотность дислокаций, $10^9, \text{ см}^{-2}$
ТО	$\alpha\text{-Fe}$ (220)	98,889	98,945	1,01379	1,0134	-270	2,77943
ТГХО	[06-0696]	98,865	98,945	1,01408	1,0134	-470	2,77711

Микронапряжения (2-го рода) в ТГХ упрочненной стали выявлены не были, поскольку на рентгенограммах отсутствовало уширение интерференционных линий. Не отмечено также статических искажений решетки, так как после ТГХО стали остается неизменным (не уменьшается) отношение интенсивностей интерференционных линий и фона ($I_{\text{нкл}}/I_{\text{фон}}$) [12; 13]. Рентгенографическим анализом не обнаружен также фазовый состав полученных покрытий, имеющих наноструктуру, которая справедливо считается рентгеноаморфной [20; 21]. Если внутренние растягивающие напряжения способствуют самопроизвольному зарождению и распространению трещин, развитию коррозионно-окислительных процессов (коррозии под напряжением, др.), то зональные сжимающие напряжения благоприятно уравнивают разрушающие напряжения, возникающие при эксплуатации инструментов и деталей машин, увеличивают их выносливость и живучесть. Формирование высоких напряжений сжатия с помощью ТГХО положительно сказывается на работоспособности стальных инструментов и деталей, поскольку позволяет: 1) компенсировать растягивающие напряжения в поверхностном слое, которые возникают при работе изделий, особенно инструментов; 2) релаксировать растягивающие напряжения, возникшие при механической, термической или другой обработке в процессе изготовления стальных изделий и инструментов.

Рассматривая вопрос улучшения износостойкости сталей в результате их гидрохимической обработки с позиции современных теорий трения и износа, можно найти объяснение в реализации эффекта Ребиндера, когда снижается коэффициент трения [9]. Эффект Ребиндера носит адгезионный характер взаимодействия поверхности любых твердых тел с поверхностно-активными веществами. В нашем случае присут-

ствии ПАВ в насыщающей среде позволяет интенсифицировать процесс поверхностного диспергирования стали, образуя устойчивую дисперсную систему на основе мицелл, которые на начальной стадии износа способны направленно двигаться в зону контакта и снижать силы адгезии [6 – 8]. В результате по принципу диффузионно-вакансионного механизма происходит скольжение внутри покрытия, но с малыми затратами энергии. Такое свободное перемещение слоев покрытия в процессе изнашивания обеспечивает ему самосмазывающий эффект.

Применение результатов исследований. Предлагаемая термогидрохимическая обработка сталей благодаря простоте технологии и хорошим антифрикционным свойствам модифицированной поверхности в случае отсутствия смазки и особенно перегрева находит широкое применение в технике для увеличения ресурса работы интенсивно эксплуатируемых инструментов и деталей машин. Результаты производственных испытаний свидетельствуют о том, что ТГХО с использованием разработанных вододисперсных оксидных составов позволяет увеличить износостойкость различных видов стальных инструментов и деталей машин в 1,3...4,5 раз по сравнению со стандартно термообработанными (табл. 3). Причем наивысшие показатели износостойкости инструментов достигнуты при обработке труднообрабатываемых жаропрочных, нержавеющей и цветных сплавов.

Таблица 3

Результаты испытаний изделий и инструментов, подвергнутых ТГХО

Вид инструмента	Материал инструмента	Место испытаний (название компании)	Повышение стойкости, К _w
Метчики	Быстрорежущие стали	«VUNZ» (Чехия); «Daewoo» (Корея); «САЛЮТ», «УМПО», «ПМЗ» (Россия); «БелАЗ», «МТЗ», «Мотовело»	2...4,1
Ленточные пилы	То же	«VUNZ» (Чехия)	2,5...3
Сверла	"_"	«PS» (Словакия); «VUNZ» (Чехия); «Дукс» (Россия), «Мотовело», «БелАЗ»	1,8.. 2,9
Зенкера	"_"	«САЛЮТ», «Искра», ВТЗ (Россия)	1,8...3
Развертки	"_"	«Мотовело», «БАТЭ», «АГУ»	1,5...2,7
Протяжка	"_"	«Мотовело», «АГУ»	2 ... 2,5
Резцы	"_"	«Мотовело», «БелАЗ»	1,3... 1,9
Долбяки	"_"	«Мотовело»	1,6...2,1
Фрезы	"_"	«Мотовело», «БелАЗ», «МТЗ»	2...4,5
Ножи для обработки стекловолокна	"_"	«Skloplast» (Словакия)	1,9...2,2
Штампы холодного деформирования	Штамповые стали	«ZVL-LSA» (Словакия), «БелАЗ»	1,8...2,5
Втулки для автосамосвала «БелАЗ»	Конструкционные стали	«БелАЗ»	1,5...2

Процесс термогидрохимической обработки внедрен в Беларуси на предприятиях «МТЗ», «БелАЗ», «Мотовело» и др.

Выводы:

1) процесс термогидрохимической обработки имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности стали осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие, а в подслое создается модифицированная зона с высокими напряжениями сжатия, сравнимыми с уровнем напряжений, создаваемых методами поверхностной пластической деформации;

2) сравнительные трибологические испытания поверхности стали У8, подвергнутой гидрохимической обработке, показали, что увеличение числа компонентов из тугоплавких антифрикционных материалов в составе вододисперсной насыщающей среды ведет к снижению коэффициента трения осажденных твердосмазочных покрытий;

3) в результате оптимизации процесса термогидрохимической обработки стали У8 коэффициент трения ее поверхности при сухом трении скольжения подвижного шарика из стали ШХ 15 снизился в 8,3 раза по сравнению с исходным состоянием. Разработанные покрытия, в отличие от других твердосмазочных покрытий, не требуют приработки, минимальные значения коэффициента трения на протяжении всего времени эксплуатации остаются на одном уровне. Отмечена высокая термическая стабильность нанокompозитных структур полученных покрытий, которые даже после нагрева до 1050 °С сохраняют при отсутствии смазки низкий коэффициент трения $f = 0,09$;

4) разработан простой способ термогидрохимической обработки, использование которого позволяет повысить стойкость различных видов стальных инструментов и деталей машин в 1,3...4,5 раза по сравнению со стандартно термообработанными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ упрочнения инструмента из быстрорежущей стали: пат. 2023027 РФ, МПК5 C21D 9/22 / А.А. Шматов, Л.Г. Ворошнин. – № 5000073; заявл. 30.07.91; опубл. 15.11.94 // Бюл. № 21. – 1994.
2. Шматов, А.А. Комбинированное объемно-поверхностное упрочнение стального режущего инструмента / А.А. Шматов // Вестн. Брест. гос. тех. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2008. – № 4. – С. 16 – 21.
3. Шматов, А.А. Нанотехнология низкотемпературного термохимического упрочнения готового к эксплуатации инструмента / А.А. Шматов // Наноструктурные материалы: получение, свойства, применение: сб. науч. тр. – Минск, 2009. – С. 221 – 230.
4. Компьютерное проектирование процесса ТГХО для формирования твердосмазочных покрытий на инструментальной стали У8 / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 2. – С. 139 – 146.
5. Шматов, А.А. Твердосмазочные тугоплавкие покрытия, полученные на сталях методом термогидрохимической обработки / А.А. Шматов, Г.К. Жавнерко // Порошковая металлургия. – 2011. – № 34. – С. 244 – 253.
6. Гаркунов, Д.Н. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин / Д.Н. Гаркунов, П.И. Корник. – М.: Изд-во МСХА, 2003. – 344 с.
7. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
8. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
9. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – 135 с.
10. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под ред. В.С. Чередниченко. – М.: Омега-Л, 2008. – 752 с.
11. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. наука, 2007. – 170 с.
12. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
13. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 107 с.
14. Бельский, С.Е. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С.Е. Бельский, Р.Л. Тофпенец. – Минск: Наука и техника, 1984. – 128 с.
15. Суздаев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздаев. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
16. Научные основы повышения малоциклового прочностного ресурса / Н.А. Махутов [и др.]; под ред. Н.А. Махутова. – М.: Наука, 2006. – 623 с.
17. Бойцов, В.Б. Технологические методы повышения прочностного ресурса и долговечности: учеб. пособие / В.Б. Бойцов, А.О. Чернявский. – М.: Машиностроение, 2005. – 128 с.
18. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифуллин. – М.: Изд-во Оникс, 2007. – 624 с.
19. Материаловедение: учебник для втузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 648 с.
20. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2009. – 416 с.
21. Наноструктурные материалы-2008. (НАНО-2008): материалы первой междунар. науч. конф. – Минск: Беларус. наука, 2008. – 765 с.

Поступила 19.01.2012

MODIFICATION OF STEEL IN AN AQUEOUS DISPERSED MEDIA

A. SHMATOV

The structure and properties of steel surface, subjected to thermo-hydrochemical treatment in an aqueous suspension of nano-sized oxides $TiO_2 + MoO_3$, are examined in the paper. The process involves: 1) the chemical treatment in an special aqueous nano-sized suspension and 2) subsequent heat treatment. Optimization of the thermo-hydrochemical process was performed. Treatment with optimal regime permits decreasing the friction coefficient of the steel surface in 8,3 as compared with untreated. Developed technology permit increasing the wear resistance of tools and parts by the factor of 1,3...4,5 in comparison with traditional its.

УДК 621.923.9

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИСКОВЫМИ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМИ ЩЕТКАМИ*канд. техн. наук Д.Ф. УСТИНОВИЧ**(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск);**В.М. ГОЛУБ**(Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка, Минск)*

Исследованы расчетные значения температуры, глубины теплового воздействия, оценен температурный режим обработки без охлаждения плоских поверхностей деталей из конструкционных сталей 45, 12Х18Н10Т и алюминиевого сплава АМг5. Установлено влияние кинематических параметров процесса (скорости резания, подачи инструмента) и теплофизических характеристик деталей на температуру материала в зоне обработки и характер распределения температуры в приповерхностной зоне. Показано, что увеличение скорости резания, уменьшение теплопроводности материала детали и скорости относительного перемещения детали и инструмента способствует увеличению мощности теплового источника и значений температуры. Предложенный метод позволяет осуществлять рациональный выбор скоростей главного рабочего движения и относительных перемещений детали и инструмента, при которых значения температуры находятся в заданном диапазоне, обеспечивается стабильность процесса шлифования и исключается ухудшение эксплуатационных показателей инструмента.

Введение. Применение эластичного инструмента на основе полимерно-абразивных волоконных композитов сопровождается возрастанием площади контакта инструмента с деталью, нивелированием абразивной поверхности относительно обрабатываемой, увеличением активных элементов в рабочей зоне, что повышает интенсивность массового абразивного микрорезания по сравнению с обработкой жестким инструментом и расширяет технологические возможности метода [1; 2]. Для отделочно-зачистной обработки плоских поверхностей, в частности поверхностей листов и лент, характерными являются операции очистки от пыли, грязи и жировых загрязнений, удаления оксидных слоев, снятия заусенцев после механической обработки, обработки с целью снижения шероховатости поверхности, удаления следов коррозии и побежалости, формирования требуемых параметров шероховатости поверхности, зачистки и подготовки поверхности под нанесение износостойких, гальванических и лакокрасочных покрытий. Применение полимерно-абразивного инструмента позволяет повысить экономическую эффективность и снизить эксплуатационные затраты [3].

Предварительный расчет основных выходных параметров процесса обработки является необходимым условием осуществления проектирования, управления и промышленного использования технологии с учетом соблюдения условий повышения производительности и обеспечения заданных характеристик качества формируемого поверхностного слоя. Температурный режим обработки является одним из факторов, влияющим на работоспособность, период стойкости, режущие свойства полимерно-абразивного инструмента и обеспечивающим производительность шлифования и формирование качества поверхностного слоя деталей. Фазовые и структурные превращения, происходящие в поверхностных слоях шлифуемых изделий, обусловлены действием высоких температур, образующихся в зоне контакта шлифовального круга с деталью. Существует аналитическая методика расчета теплового состояния плоских поверхностей при шлифовании дисковым инструментом, учитывающая физико-механические и теплофизические условия обработки, режимы резания, геометрические размеры обрабатываемых деталей, что позволяет значительно облегчить и минимизировать трудоемкие экспериментальные исследования [4]. Тем не менее к настоящему времени не проводилась реализация методики с целью установления взаимосвязи между режимами шлифования и температурой в зоне обработки и определения допустимых параметров эксплуатации инструмента. Контактная температура шлифования оказывает наибольшее влияние на износ и термомеханическую деструкцию режущей части полимерно-абразивных волокон [5]. Информация о распределении тепловых потоков, величине и характере температурных полей в инструменте и детали послужит основой для осуществления рационального выбора инструмента и методов охлаждения, оптимизации процесса шлифования с целью минимизации теплового воздействия на поверхность изделия и рабочую поверхность инструмента, обеспечения требуемого качества изделий при минимальной себестоимости обработки. Поэтому задача аналитического расчета тепловых потоков, анализа температурных полей и теплового состояния плоских поверхностей, обеспечивающая возможность выбора рациональных параметров шлифования дисковыми полимерно-абразивными щетками, является актуальной.

Цель данной работы – исследование методом аналитического моделирования тепловых режимов обработки плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками и изучение их основных закономерностей.

Результаты исследований и их анализ. Установлено, что при абразивной обработке большая часть тепловой энергии, являющейся результатом резания и трения в зоне контакта инструмента с поверхностью, расходуется на нагрев поверхностных слоев изделия [6 – 8].

Для исследования тепловых режимов рассмотрим традиционную схему шлифования плоской детали. Согласно данной схеме по поверхности детали перемещается вращающаяся полимерно-абразивная щетка в форме диска, при этом каждое волокно является локальным источником тепловыделения на поверхности контакта. Представим единый источник тепла, действующий непрерывно и перемещающийся по поверхности детали с постоянной скоростью, как совокупный результат элементарных тепловых потоков, активно участвующих в процессе шлифования. Воспользуемся выражением (1) для определения температурного поля в обрабатываемой детали в любой конкретный момент времени [4]:

$$T(x, y, z, t) = 32 \cdot \frac{aQ}{\lambda B} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_k \frac{d}{2} \mu_k \cdot \cos \gamma_k x + hL \cdot \sin \gamma_k x}{\mu_k^2 + h^2 L^2 + 2hL} \times$$

$$\times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \gamma_n \frac{b}{2} \left(\cos \gamma_n \cdot \left(\frac{b}{2} + Y1 \right) + \frac{h}{\gamma_n} \sin \gamma_n \cdot \left(\frac{b}{2} + Y1 \right) \right) \mu_n \cdot \cos \gamma_n \cdot y + hH \cdot \sin \gamma_n \cdot y}{\mu_n^2 + h^2 H^2 + 2hH} \times$$

$$\times \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F_{kmm}^1 t + F_{kmm}^2 t}{a^2 \gamma_{kmm}^2 + \gamma_k^2 v^2} \frac{\mu_m \cdot \cos \gamma_m \cdot z + h \cdot B \sin \gamma_m \cdot z}{\mu_m^2 + h^2 B^2 + 2hB}.$$

Коэффициенты в формуле (1) определялись следующим образом:

$$F_{kmm}^1 t = a\gamma_{kmm}^2 \cdot \cos \gamma_k \cdot \left(\frac{d}{2} + vt \right) + \gamma_k v \cdot \sin \gamma_k \cdot \left(\frac{d}{2} + vt \right) - \left(a\gamma_{kmm}^2 \cdot \cos \gamma_k \cdot \frac{d}{2} + \gamma_k v \sin \gamma_k \cdot \frac{d}{2} \right) e^{-a\gamma_{kmm}^2 t}; \quad (2)$$

$$F_{kmm}^2 t = \frac{h}{\gamma_k} \left\{ a\gamma_{kmm}^2 \sin \gamma_k \left(\frac{d}{2} + vt \right) - \gamma_k v \cdot \cos \gamma_k \cdot \left(\frac{d}{2} + vt \right) - \left(a\gamma_{kmm}^2 \cdot \sin \gamma_k \cdot \frac{d}{2} - \gamma_k v \cdot \cos \gamma_k \cdot \frac{d}{2} \right) e^{-a\gamma_{kmm}^2 t} \right\}, \quad (3)$$

где a – температуропроводность детали, m^2/c ; λ – теплопроводность детали, Вт/(м·град); L, H, B – соответственно длина, ширина и высота детали, м; Q – плотность теплового потока; b – ширина щетки, м; d – длина пятна контакта, м; $Y1$ – расстояние от края детали до пятна контакта, м; v – продольная скорость перемещения, м/с.

Численные решения выполнялись с учетом следующих условий: скорость резания $V = 10,5 \dots 25,6$ м/с; величина натяга (радиальной деформации) инструмента $\delta = 2$ мм; продольная подача $v = 0,01 \dots 0,03$ м/с; ширина образца $H = 0,05$ м; длина образца $L = 0,2$ м; высота образца $B = 0,02$ м; материал – сталь 45, сталь 12X18H10T, сплав АМг5. Температура окружающего воздуха принята равной 20 °С; коэффициент теплопроводности воздуха $k = 0,0279$ Вт/(м·град); числа Грасгофа и Прандтля соответственно: $Gr = 10000$ и $Pr = 0,71$; коэффициент теплоотдачи с поверхности плоской детали $\alpha \approx 6$ Вт/(m^2 ·град). Визуализация результатов расчета осуществлялась с помощью пакетов *DIGITAL Visual Fortran* и *Orygin Professional*.

Влияние продольной подачи инструмента в диапазоне $v = 0,01 \dots 0,03$ м/с на величину температуры поверхности представлено на рисунке 1.

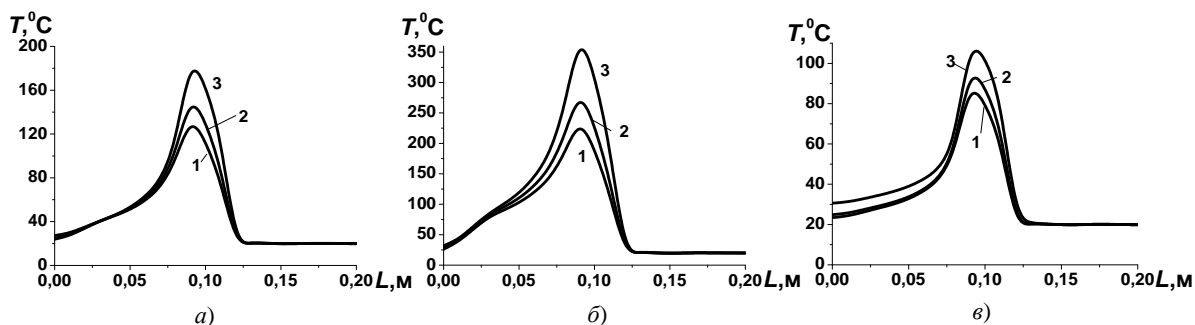


Рис. 1. Влияние величины подачи на температурное поле поверхности образцов при $v = 0,03$ м/с (1), $v = 0,02$ м/с (2), $v = 0,01$ м/с (3); $\delta = 2$ мм, $V = 25,6$ м/с: а – сталь 45; б – сталь 12X18H10T; в – сплав АМг5

Анализ расчетных зависимостей свидетельствует о снижении контактной температуры с ростом продольной подачи, обуславливающей уменьшение времени воздействия теплового источника. Наиболее высокие значения температуры характерны для стали 12X18H10T. Максимальные значения температуры зафиксированы в зоне контакта инструмента с поверхностью детали. С удалением от зоны контакта температура в расчетных точках уменьшается. Возрастает скорость взаимодействия холодных участков детали ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) с тепловым источником, уменьшается время действия теплового источника, что приводит к снижению контактных температур. Как показали проведенные исследования, эксплуатация полимерно-абразивного инструмента без охлаждения при обработке стали 12X18H10T при $V = 25,6\text{ м/с}$ и $\delta = 2\text{ мм}$ невозможна при продольной подаче инструмента менее $v = 0,03\text{ м/с}$, поскольку контактная температура превысит температуру плавления полимерного связующего ($T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$). При шлифовании со скоростью $v = 0,01\text{ м/с}$ контактная температура достигает $T = 357,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, увеличение скорости подачи в 3 раза приводит к снижению значений температуры в 1,59 раза ($T = 224,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). При шлифовании стали 45 температура находится в интервале $T = 179,4 \dots 127,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (снижается в 1,41 раза), сплава АМг5 – соответственно $T = 107,2 \dots 86,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (снижается в 1,24 раза).

Количество тепла, переходящее в деталь, существенно зависит от обрабатываемого материала и оказывает влияние на величину контактной температуры (см. рис. 1; рис. 2).

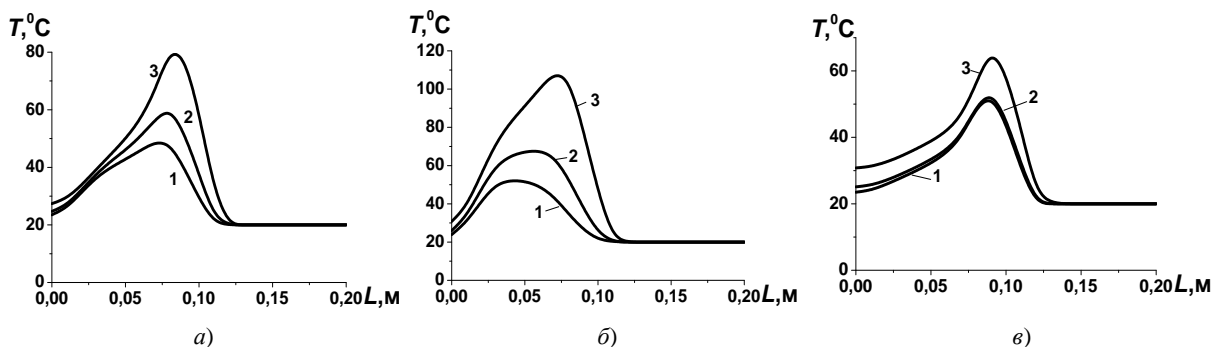


Рис. 2. Влияние величины подачи на температурное поле на глубине 5 мм от поверхности образцов при $v = 0,03\text{ м/с}$ (1), $v = 0,02\text{ м/с}$ (2), $v = 0,01\text{ м/с}$ (3); $V = 25,6\text{ м/с}$; $\delta = 2\text{ мм}$:
а – сталь 45; б – сталь 12X18H10T; в – сплав АМг5

Наибольшие значения температуры поверхности зафиксированы у сталей 12X18H10T и 45 (соответственно $T = 357,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T = 179,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), что объясняется различными коэффициентами теплопроводности. При шлифовании сплава АМг5 в деталь переходит значительно большее количество теплоты в единицу времени, чем у сталей, что обеспечивает наименьшую температуру нагрева поверхности ($T = 107,2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Наибольшие значения температуры нагрева приповерхностного слоя на глубине 5 мм зафиксированы для стали 12X18H10T и стали 45 (соответственно $T = 107,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T = 79,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), наименьшие ($T = 64,6\text{ }^{\circ}\text{C}$) – для сплава АМг5 (см. рис. 2). Полученные результаты свидетельствуют о неравномерном распределении температур на обрабатываемой поверхности и в приповерхностном слое и о различных значениях температурных градиентов для каждого исследуемого материала. Перемещение теплового источника по холодной поверхности вала с температурой $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопровождается резким повышением температуры до максимума в зоне контакта с инструментом и последующим охлаждением с несколько меньшей интенсивностью. Температура поверхности стали 12X18H10T отличается от температуры на глубине 5 мм в 3,31 раза, стали 45 – в 2,25 раза, сплава АМг5 – в 1,66 раза ($v = 0,01\text{ м/с}$). Анализ рисунка 2 показал, что скорость взаимного перемещения детали и инструмента оказывает существенное влияние на распределение тепла в приповерхностной области. С увеличением скорости подачи до $v = 0,03\text{ м/с}$ максимум температуры смещается в сторону, противоположную направлению перемещения теплового источника (направлению подачи). Полученные данные свидетельствуют о незначительном влиянии теплонпряженности процесса полимерно-абразивного шлифования при рассмотренных режимах на степень изменения микротвердости, глубину залегания технологических остаточных напряжений и возможность протекания структурных и фазовых превращений в приповерхностном слое, причинами которых при традиционном шлифовании кругами на керамической связке являются высокие температуры.

На рисунке 3 приведено распределение температуры на поверхности образцов при обработке со скоростью резания в диапазоне $V = 10,5 \dots 25,6\text{ м/с}$. Анализ результатов показывает, что ужесточение режимов обработки сопровождается ростом значений температуры. Это свидетельствует о возрастании мощности теплового источника вследствие увеличения сил резания, пластической деформации и трения, приводящих к интенсификации процессов теплообразования. Возрастает длина пути резания – трения и общее количество тепловых импульсов, создаваемых волокнами инструмента в единицу времени, что

приводит к росту контактной температуры для всех исследуемых материалов: с $T = 44,6$ до $T = 145,2$ °C (сталь 45); с $T = 71,3$ до $T = 267,7$ °C (сталь 12X18H10T); с $T = 34,8$ до $T = 93,1$ °C (AMг5).

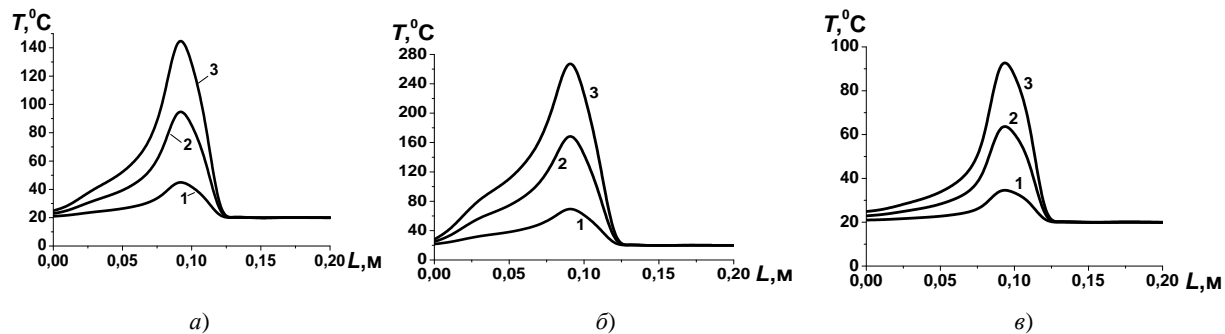


Рис. 3. Влияние скорости резания на температурное поле поверхности образцов при $V = 10,5$ м/с (1), $V = 19,2$ м/с (2), $V = 25,6$ м/с (3); $v = 0,02$ м/с, $\delta = 2$ мм:
а – сталь 45; б – сталь 12X18H10T; в – сплав АМг5

Из сопоставления кривых, рассчитанных для различных скоростей, видно, что максимум температуры при шлифовании дисковой щеткой наблюдаются в области пятна контакта. Как показали проведенные исследования, эксплуатация полимерно-абразивного инструмента без охлаждения при обработке стали 12X18H10T нежелательна при скорости резания $V = 25,6$ м/с, поскольку контактная температура превышает температуру плавления полимерного связующего ($T = 220$ °C). Полученные данные позволяют осуществить выбор предельных значений скорости резания при обработке без охлаждения различных материалов. Анализ приповерхностной области показывает (рис. 4), что температура по мере удаления от зоны контакта снижается.

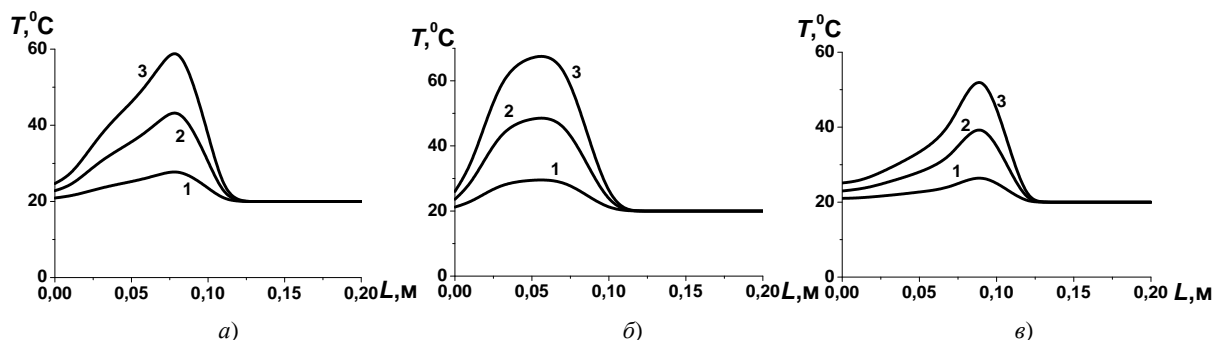


Рис. 4. Влияние скорости резания на температурное поле на глубине 5 мм от поверхности образцов при $V = 10,5$ м/с (1), $V = 19,2$ м/с (2), $V = 25,6$ м/с (3); $v = 0,02$ м/с, $\delta = 2$ мм:
а – сталь 45; б – сталь 12X18H10T; в – сплав АМг5

Для рассмотренного диапазона скоростей резания максимальная температура на поверхности стали 12X18H10T превышает температуру на глубине 5 мм в 2,39...3,98 раза, стали 45 – в 1,58...2,47 раза, сплава АМг5 – в 1,29...1,78 раза, при этом наибольшие значения диапазонов соответствуют более высоким температурам.

Заключение. Изучение условий теплового взаимодействия при шлифовании плоских поверхностей полимерно-абразивными щетками позволяет осуществлять выбор технологических параметров обработки с учетом производительности процесса, стойкости инструмента и качества обрабатываемой поверхности. Предлагаемый метод позволяет проанализировать распределение температуры по сечению обрабатываемой детали в любой момент времени и построить изотермы температурных полей и градиентов температур с целью анализа возможных структурных превращений и расчета величин остаточных напряжений. С помощью аналитического расчета исследованы величина контактной температуры, глубина теплового воздействия и оценен температурный режим обработки с целью обеспечения безопасных температур поверхности детали и инструмента. Установлена связь между контактной температурой в зоне обработки, теплофизическими характеристиками образцов и кинематикой процесса. Получены значения распределения температуры по поверхности и в приповерхностном слое образцов из сталей 12X18H10T, 45 и сплава АМг5. Исследованиями установлено, что увеличение скорости резания и уменьшение скорости относительных перемещений детали и инструмента способствует увеличению

мощности теплового источника и значений контактной температуры. Предложенный метод позволяет обеспечить стабильность процесса шлифования и эксплуатационных характеристик инструмента за счет рационального выбора скорости главного рабочего движения и скорости относительных перемещений детали и инструмента при обработке без охлаждения плоских поверхностей деталей, при которых значения контактной температуры не превышают заранее установленного значения. В дальнейшем предполагается экспериментальная проверка расчетных данных, правомерности принятых допущений и граничных условий путем непосредственного измерения температур в процессе обработки плоских поверхностей деталей дисковыми полимерно-абразивными щетками.

Статья выполнена в рамках выполнения задания 4.3.06/2 подпрограммы «Материалы в технике» ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Устинович, Д.Ф. Финишная обработка полимерно-абразивными волоконными композитами / Д.Ф. Устинович // Инженер-механик. – 2002. – № 4(17). – С. 33 – 37.
2. Проволоцкий, А.Е. Повышение производительности процесса обработки полимер-абразивными инструментами / А.Е. Проволоцкий, С.Л. Негруб, Д.А. Старостин // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 32. – С. 207 – 214.
3. Устинович, Д.Ф. Отделочно-зачистная обработка листовых материалов эластичным инструментом с дискретным режущим контуром / Д.Ф. Устинович, В.И. Прибыльский // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. 16 междунар. науч.-техн. конф.: в 4-х т., Севастополь, 14 – 19 сент. 2009 г.; ДонНТУ. – Донецк, 2009. – Т. 3. – С. 176 – 179.
4. Устинович, Д.Ф. Моделирование тепловых процессов при обработке плоских поверхностей полимерно-абразивными щетками / Д.Ф. Устинович, В.М. Голуб // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. материалов 6 междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14 – 16 сент. 2011 г.; ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2011. – Кн. 2. – С. 379 – 385.
5. Устинович, Д.Ф. Исследование износостойкости инструмента на основе полимерно-абразивных композитов / Д.Ф. Устинович // Композиционные материалы в промышленности: сб. тр. 29 междунар. науч.-техн. конф., Ялта, 1 – 5 июня 2009 г.; УИЦ «Наука. Техника. Технология». – Киев, 2009. – С. 137 – 139.
6. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
7. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
8. Якимов, А.В. Теплофизика механической обработки / А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – Киев-Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.

Поступила 15.12.2011

THERMAL CONDITIONS CONTROL ON PROCESSING OF FLAT SURFACES BY DISK POLYMER-ABRASIVE BRUSHES

D. USTSINOVICH, V. GOLUB

The investigation has been made of calculated values of temperatures and depth of thermal effect. The temperature conditions of processing have been assessed without cooling flat surfaces of parts made of constructional steels 45, 12X18H10T and AMz5 aluminum alloy. It is established that kinematics process parameters (cutting speed, value) and thermophysical characteristics of parts affect the value of temperature in the working area as well as the type of temperature distribution in subsurface zone. The increase of cutting speed, decrease of heat conductivity of a part material and speed of mutual part-tool movement are shown to facilitate increase of thermal source power and contact temperature values. The method suggested makes it possible to make a rational selection of principal working motion and relative part-tool movement at which the values of contact temperature are in a preset range, the stability of the process is ensured and deterioration of tool operating characteristics is avoided.

УДК 541.115

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМОРФНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
ДЛЯ ТЕРМО- И КРИОСТАТИРОВАНИЯ****канд. физ.-мат. наук, доц. Я.О. ШАБЛОВСКИЙ**
(Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого)

Термохимические свойства неорганических кристаллов, обладающих полиморфизмом, позволяют создавать на их основе эффективные энергетические устройства, способные служить аккумуляторами теплоты либо холода, а также обеспечивать термо- либо криостатирование. Предложены конструктивные схемы тепловых аккумуляторов со ступенчатой разрядкой для предпускового разогрева поршневых двигателей и для поддержания номинального температурного режима каталитических нейтрализаторов их выхлопных газов. Для аккумуляции холода при температуре от -30 до -123 °C предложено использовать в качестве криостатирующих материалов кристаллические вещества, испытывающие в этой температурной области обратимые полиморфные превращения. Среди известных неорганических веществ определены наиболее перспективные вещества, рекомендованные для применения в качестве рабочих веществ тепловых аккумуляторов предпускового прогрева и каталитического реактора, а также кристаллов.

Введение. Всем кристаллическим веществам свойственен полиморфизм, т.е. способность существовать в нескольких модификациях, различающихся своим строением [1]. Явление полиморфизма активно изучалось многими исследователями (см. обзор [2]). Однако при этом сформировался специфический дисбаланс: в теоретических работах полиморфизм расценивается как фундаментальный феномен кристаллохимии [3; 4], тогда как с прикладной точки зрения полиморфизм традиционно рассматривается лишь как эффект, затрудняющий твёрдофазный синтез [5].

Полиморфизм действительно существенно усложняет получение, хранение и применение твёрдых реагентов. Однако сугубо нежелательным является лишь монотропный («односторонний») полиморфизм [6]. Вещества, обладающие энантиотропным («обратимым») полиморфизмом, имеют выгодное сочетание термохимических характеристик, позволяющее существенно продвинуться в решении некоторых технических задач, связанных с проблемой стабилизации температуры систем конечных размеров. «Термохимический» способ решения этой проблемы и является предметом нашей разработки.

Постановка задачи и её техническое решение. Единственный способ компенсации несогласованности выработки и потребления тепловой энергии – аккумулярование тепла [7]. В простейших тепловых аккумуляторах (ТА) накопление тепла осуществляется за счёт высокой теплоёмкости теплоаккумулирующего вещества (ТАВ). Температура разрядки таких аккумуляторов нестабильна, а удельная плотность накопления энергии очень мала [8]. Значительно более эффективно тепловое аккумулярование, основанное на изменении фазового состояния ТАВ: при использовании ТАВ с фазовым превращением (ФП) не только достигается высокая плотность накопления теплоты, но и обеспечивается постоянная температура разрядки – температура ФП теплоаккумулирующего вещества [8; 9]. Наибольшее количество теплоты аккумулируется при парообразовании, но такой способ накопления тепла не нашёл широкого применения из-за чрезмерно больших относительных приращений удельного объёма ТАВ при его испарении. В современной технике в качестве ТАВ с ФП используются кристаллические и жидкие вещества [9].

В последнее время ТА с ФП всё шире применяются для предпускового прогрева поршневых двигателей [7; 10]. Однако из-за того, что температура разрядки типовых ТА [11] неизменна и равна температуре фазового превращения ТАВ, эффективность прогрева двигателя, запускаемого в разных погодных условиях, существенно зависит от температуры окружающей среды. Для повышения эффективности ТА с ФП нами предложено использовать в качестве ТАВ неорганические кристаллы, обладающие множественным полиморфизмом, т.е. вещества, у которых на сравнительно небольшом ($50 \dots 150$ К) отрезке температур располагается несколько точек полиморфных превращений.

Целесообразность накопления теплоты в полиморфных материалах была отмечена ещё в 70-х годах прошлого века [12]. Тем не менее вплоть до недавнего времени такой способ термоаккумуляции рассматривался лишь как принципиально возможный [13], а в качестве рабочих ТАВ использовались исключительно плавкие вещества [7; 9]. Использование в качестве ТАВ полиморфных кристаллических веществ позволяет не только упростить, но и удешевить конструкцию ТА, поскольку избавляет от необходимости защиты его элементов от химического воздействия коррозионно-активных расплавов. Ещё более важным достоинством выдвигаемого технического решения является обеспечение ступенчатой разрядки ТА.

В самом деле, в отличие от типовых ТА [11], в предложенной нами конструкции теплового аккумулятора (рис. 1) предусмотрено использование в качестве ТАВ неорганических кристаллов, обладаю-

ших множественным полиморфизмом. Тем самым конструктивно предусматривается наличие у ТА не одной, а по крайней мере двух температур теплового разряда. Ступенчатый разряд ТА обеспечивает более гибкую балансировку температурного режима и, в частности, позволяет существенно увеличить допустимую продолжительность безгаражного хранения автомобилей при низких температурах.

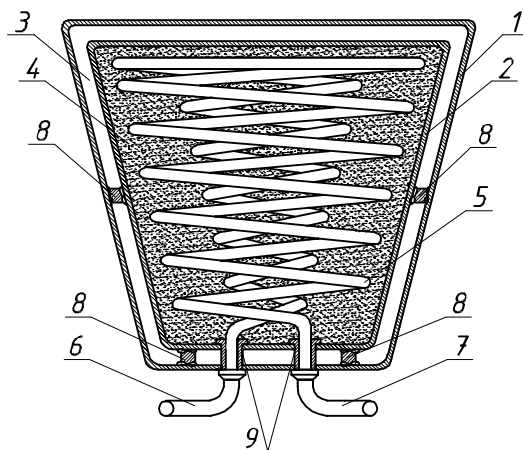


Рис. 1. Принципиальная схема теплового аккумулятора:

- 1 – внешний корпус; 2 – внутренний корпус; 3 – вакуумная либо порошково-вакуумная теплоизоляция;
4 – теплоаккумулирующее вещество; 5 – трубка теплообменника;
6 – патрубок входа; 7 – патрубок выхода; 8 – переключки; 9 – втулки

Показанное на рисунке 1 устройство состоит из внешнего 1 и внутреннего 2 корпусов, выполненных из нержавеющей стали (например, 12X18Н10Т, 12X18Н9Т, 12X17Г9АН4, 10X14Г14Н4Т, 08X18Н10) и разделённых вакуумом либо порошково-вакуумной теплоизоляцией 3. Внутри корпуса 2, заполненного теплоаккумулирующим веществом 4, размещена выполненная по ГОСТ 21646-2003 из меди марок М1р (М1ф) или М2р спиралевидная трубка 5, сообщённая при помощи патрубков входа 6 и выхода 7 с системой охлаждения двигателя. Для снижения тепловых потерь переключки 8 и втулки 9 выполняют из материала с низким коэффициентом теплопроводности (пеноалюминий либо сплавы на основе титана марок ВТ1, ВТ5-1, ВТ20). Выполнение корпуса ТА в форме опрокинутого усечённого конуса минимизирует эффект воздействия на корпус механических напряжений, обусловленных скачком удельного объёма ТАВ в точке ФП, что в свою очередь избавляет от необходимости ограничиваться при выборе ТАВ веществами, незначительно изменяющимися при ФП свой объём.

Работа ТА осуществляется следующим образом. Тепловой аккумулятор заряжается во время работы двигателя, когда нагретая его сбросной теплотой охлаждающая жидкость нагнетается через входной патрубок 6 для циркуляции по спиралевидной трубке 5 и возвращается через патрубок выхода 7 в систему охлаждения двигателя. Циркулирующая по трубке 5 охлаждающая жидкость нагревает теплоаккумулирующий материал, испытывающий при этом последовательность обратимых полиморфных превращений с поглощением теплоты. Тепловая изоляция 3 поддерживает температуру теплоаккумулирующего вещества 4 на уровне, превышающем температуру его полиморфных превращений, и обеспечивает хранение аккумулированной тепловой энергии. Тепловой аккумулятор разряжается перед запуском холодного двигателя в результате теплообмена между охлаждающей жидкостью, циркулирующей по трубке 5, и теплоаккумулирующим веществом 4. Остывание теплоаккумулирующего вещества в процессе указанного теплообмена сопровождается последовательностью полиморфных превращений с выделением теплоты. Нагретая ею охлаждающая жидкость через выходной патрубок 7 поступает к двигателю и разогревает его.

Среди неорганических веществ, обладающих множественным полиморфизмом, наиболее перспективными ТАВ для устройств предпускового прогрева двигателей представляются нитрит калия KNO_2 и гексафторофосфат калия KPF_6 . Термохимические характеристики этих веществ, заимствованные из работ [14 – 17], приведены в таблице 1.

В рассмотренном выше случае число ступеней разрядки ТА определяется числом полиморфных превращений, которые испытывает ТАВ в рабочем интервале температур. Число ступеней разрядки и их положения на температурной шкале можно варьировать, совместно используя в конструкции теплового аккумулятора несколько разных термически изолированных друг от друга ТАВ, т.е. применяя «комбинированный» ТА. При этом сочетания ТАВ целесообразно выбирать таким образом, чтобы точки их ФП делили рабочий интервал температур на приблизительно равные промежутки. Такой ТА с многоступен-

Показанное на рисунке 2 устройство образовано соосно размещёнными одна над другой секциями, каждая из которых представляет собой тепловой аккумулятор. Секция состоит из внешнего 1 и внутреннего 2 корпусов в форме опрокинутого усечённого конуса, изготовленных из нержавеющей стали и разделённых вакуумом либо порошково-вакуумной теплоизоляцией 3. Объём корпуса 2 заполнен теплоаккумулирующим веществом 4, способным претерпевать обратимые ФП (переход «плавление – кристаллизация», полиморфные превращения) с выделением/поглощением теплоты. При этом разные секции заполнены разными веществами и, соответственно, имеют различные температуры разрядки. Внутри медной сквозной трубы 5 расположены каталитические реакторы 6, оборудованные сетчатыми перегородками 7 из нержавеющей стали. Для снижения тепловых потерь переключки 8 и втулки 9, 10 выполняются из материала с низким коэффициентом теплопроводности. Болтовое соединение секций осуществляется при помощи двутавровых профилей 11 из нержавеющей стали. Для циркуляции охлаждающей жидкости двигателя в объёме внутреннего корпуса нижней секции размещена медная спиралевидная трубка 12, снабжённая патрубками 13 и 14.

Устройство работает следующим образом. При работе двигателя в номинальном режиме нагреваемое проходящими через трубу 5 выхлопными газами ТАВ 4 претерпевает ФП с поглощением скрытой теплоты (плавление либо полиморфный переход в высокотемпературную модификацию). При работе двигателя в режимах, отличных от номинального (пуск двигателя, холостой ход), температура отработавших газов в трубе 5 снижается, что приводит к остыванию ТАВ. Понижение его температуры до точки ФП вызывает фазовое превращение с выделением в объёме внутреннего корпуса 2 теплоты, поддерживающей температурный режим, необходимый для эффективной каталитической очистки. Для предпускового прогрева двигателя в нижнюю секцию устройства через патрубки 13 по спиралевидной трубе 12 прокачивают охлаждающую жидкость. Процесс прогрева происходит аналогично описанному выше.

В таблице 2 приведены вещества, по своим термохимическим характеристикам пригодные для использования в качестве ТАВ. Отбор веществ был произведён в ходе обработки литературных экспериментальных данных [21 – 26] с учётом того, что предлагаемая конструкция ТА предназначена одновременно для предпускового прогрева двигателя и для стабилизации температурного режима каталитического нейтрализатора его выхлопных газов. По этой причине таблица 2 разделена на две части. В её верхней части указаны вещества (оксиды ванадия), которые можно использовать в качестве ТАВ секции комбинированного ТА, обеспечивающей предпусковой прогрев двигателя. Теплоаккумулирующим ФП этих веществ является полиморфное превращение. В нижней части таблицы 2 приведены вещества, которые можно использовать в качестве ТАВ секции, обеспечивающей стабилизацию температурного режима каталитического нейтрализатора выхлопных газов; теплоаккумулирующим ФП перечисленных веществ является плавление.

Таблица 2

Термохимические характеристики теплоаккумулирующих веществ для комбинированного теплового аккумулятора

Вещество	Температура ФП, °С	Теплота ФП, кДж/кг
VO ₂	66	51,8
V ₂ O ₄	67	54,2
PbBr ₂	373	57
Tl ₂ O	303	71,3
Na ₂ SO ₄	241	76,8
KBF ₄	283	111,6
NaNCS	316	298,8

Способность устройств рассматриваемого типа поддерживать определённый температурный уровень может использоваться не только в автомобильном хозяйстве. Вообще говоря, ТА с ФП позволяет стабилизировать температуру любой системы конечных размеров. При этом поскольку ФП рабочих ТАВ обратимы, ТА с ФП способен не только предотвращать переохлаждение, как это обсуждалось выше, но и предохранять от перегрева, т.е. выступать в качестве аккумулятора холода.

На рисунке 3 представлена схема устройства, предназначенного для поддержания температуры в окрестности заданного значения $T = T_0$ и способного служить как криостатом ($T < T_0$), так и термостатом ($T > T_0$). Устройство представляет собой аккумулятор типа, показанного на рисунке 1, дополненный криостатируемым (либо термостатируемым) медным сосудом 4 с крышкой 5. Пространство между внутренним корпусом 2 и сосудом 4 заполнено холодоаккумулирующим (либо теплоаккумулирующим) веществом 6,

испытываемым при температуре $T = T_0$ обратимый ФП. Остальные конструктивные элементы полностью аналогичны соответствующим элементам теплового аккумулятора, рассмотренного выше (см. рис. 1).

Устройство заряжается в результате теплообмена рабочего вещества с жидкостью, прокачиваемой по спиралевидной трубке 7, при этом для криостатирования используется жидкость с температурой $T < T_0$, а для термостатирования – жидкость с температурой $T > T_0$. В результате теплообмена этой жидкости с веществом 6 последнее охлаждается и испытывает обратимое фазовое превращение с выделением теплоты (при криостатировании) либо нагревается и испытывает обратимое фазовое превращение с поглощением теплоты (при термостатировании). После создания в сосуде 4 требуемого температурного уровня нагнетание жидкости по спиралевидной трубке прекращают. Устройство автономно поддерживает заданный температурный уровень благодаря тому, что действие тепловой изоляции 3 дополняется тепловым контактом сосуда 4 с веществом 6. Если температура сосуда достигнет порогового значения $T = T_0$, то вещество 6 испытает фазовое превращение с поглощением теплоты (при криостатировании) либо с выделением теплоты (при термостатировании), что обеспечит восстановление требуемого температурного уровня в сосуде.

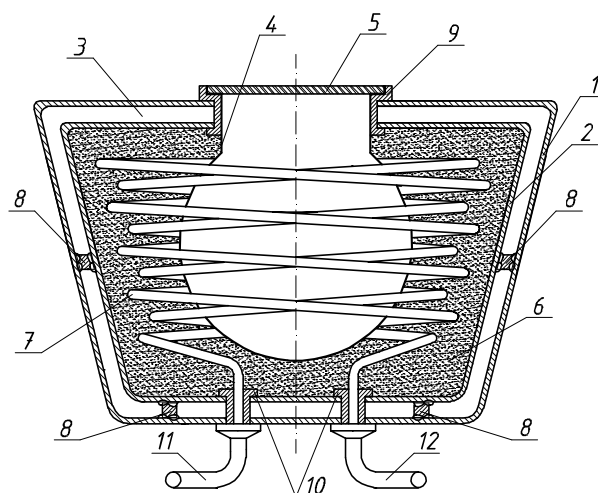


Рис. 3. Принципиальная схема криостата/термостата:

- 1 – внешний корпус; 2 – внутренний корпус; 3 – вакуумная либо порошково-вакуумная теплоизоляция; 4 – термо- либо криостатируемый сосуд; 5 – крышка сосуда; 6 – теплоаккумулирующее вещество; 7 – трубка теплообменника; 8 – перемычки; 9; 10 – втулки; 11 – патрубок входа; 12 – патрубок выхода

Как и у аккумуляторов теплоты, рабочим ФП аккумуляторов холода традиционно служит плавление. Однако если у аккумуляторов теплоты температурный диапазон достаточно широк [27], то у известных аккумуляторов холода область рабочих температур весьма узка, так как вещества, плавящиеся при низких температурах, как правило, имеют низкую температуру кипения. Обычно для аккумуляции холода используют воду и рассолы. Применение таких холодоаккумулирующих веществ возможно лишь при не слишком низких температурах (от 0 до -30 °С). Для расширения диапазона рабочих температур аккумулятора холода и в особенности для их существенного понижения предлагается использовать в качестве холодоаккумулирующих веществ полиморфные кристаллические вещества. В таблице 3 указаны вещества, пригодные для аккумуляции холода при температурах от -30 до -123 °С.

Таблица 3

Термохимические характеристики холодоаккумулирующих веществ для низкотемпературного криостатирования

Вещество	Температура ФП, °С	Теплота ФП, кДж/кг
NH_4Cl	$-30,6$	21,9
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	$-49,5$	29,6
SiCl_4^*	-69	45,4
NaBH_4	$-83,3$	26,4
NH_4BF_4	-95	15,1
V_2O_3	-123	19,3

Термохимические характеристики этих веществ заимствованы из литературных источников [21 – 23; 28 – 31]. Холодоаккумулирующим ФП перечисленных веществ является полиморфное превращение. Исключение составляет тетрахлорид кремния SiCl_4 (в таблице 3 отмечен звездочкой), у которого холодоаккумулирующим ФП является плавление.

Заключение. Термохимические свойства неорганических кристаллов, обладающих полиморфизмом, позволяют создавать на их основе эффективные энергетические устройства, способные служить аккумуляторами теплоты либо аккумуляторами холода, а также обеспечивать термо- либо криостатирование. Важным преимуществом таких устройств является их автономность: при «термохимической» аккумуляции теплоты/холода не требуется аппаратное сопровождение (датчики температуры и т.п.).

Предложены конструктивные схемы тепловых аккумуляторов со ступенчатой разрядкой для предпускового разогрева поршневых двигателей и для поддержания номинального температурного режима каталитических нейтрализаторов их выхлопных газов. Для аккумуляции холода при температурах от -30 до -123°C предложено использовать в качестве криостатирующих материалов кристаллические вещества, испытывающие в этой температурной области обратимые полиморфные превращения.

Среди известных неорганических веществ определены наиболее перспективные вещества, рекомендованные для применения в качестве рабочих веществ тепловых аккумуляторов предпускового прогрева и каталитического реактора (см. табл. 1 и 2), а также криостатов (см. табл. 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Müller, U. Inorganic structural chemistry / U. Müller. – Chichester: John Wiley & Sons, 2006. – 268 p.
2. Шабловский, Я.О. Кристаллохимия и термодинамика структурного полиморфизма неорганических соединений / Я.О. Шабловский // Физика и химия твёрдого тела. – 2010. – Т. 11, № 3. – С. 631 – 645.
3. Кузьмичева, Г.М. Основные кристаллохимические категории / Г.М. Кузьмичева. – М.: Изд-во МИТХТ, 2001. – С. 42 – 47.
4. Хисина, Н.Р. Кристаллохимия фазовых превращений минералов / Н.Р. Хисина. – М.: МГУ, 2004. – 97 с.
5. Свиридов, В.В. Неорганический синтез / В.В. Свиридов, Г.А. Попкович, Е.И. Василевская. – Минск: Университетское, 1996. – 166 с.
6. Cohen, E. Die Metastabilität der Elemente und Verbindungen als Folge von Enantiotropie oder Monotropie / E. Cohen, K. Dekker // Ztschr. für Phys. Chem. – 1927. – Bd. 127, № 3/4. – S. 183 – 190.
7. Шульгин, В.В. Тепловые аккумуляторы автотранспортных средств / В.В. Шульгин. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 268 с.
8. Данилин, В.Н. Физическая химия тепловых аккумуляторов / В.Н. Данилин. – Краснодар: Краснодарск. политехн. ин-т, 1981. – 91 с.
9. Шишкин, Н.Д. Тепловые аккумуляторы с фазовым переходом / Н.Д. Шишкин, Ю.В. Цымбалюк. – Ростов н/Д, 2005. – 120 с.
10. Семенов, Н.В. Эксплуатация автомобилей в условиях низких температур / Н.В. Семенов. – М.: Транспорт, 1993. – 190 с.
11. Алексеев, В.А. Проектирование тепловых аккумуляторов / В.А. Алексеев, В.В. Малоземов. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. – 89 с.
12. Leffler, A. Considerations in the use of solid-solid phase transitions for thermal energy storage / A. Leffler, D. Weinstein // Sun: Mankind's future source of energy. – N.Y.: Pergamon Press, 1978. – Vol. 1. – P. 507 – 510.
13. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications / A. Sharma [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13, № 2. – P. 318 – 345.
14. Rapoport, E. Phase diagrams of sodium nitrite and potassium nitrite to 40 kbar / E. Rapoport // Journal of Chemical Physics. – 1966. – Vol. 45, № 8. – P. 2721 – 2728.
15. Clark, J. Pressure dependence of the III – II transformation in KNO_2 / J. Clark, E. Rapoport // Journal of Chemical Physics. – 1968. – Vol. 49, № 5. – P. 2453 – 2454.
16. Heyns, A. Vibrational spectra and high-pressure polymorphism of KPF_6 / A. Heyns, C. Pistorius // Spectrochimica Acta. Part A. – 1974. – Vol. 30, № 1. – P. 99 – 116.
17. Phases and phase transitions of KPF_6 / P. Huber [et al.] // Ferroelectrics. – 1997. – Vol. 203, № 1 – 4. – P. 211 – 219.
18. Жегалин, О.И. Каталитические нейтрализаторы транспортных двигателей / О.И. Жегалин, Н.А. Китросский, В.А. Панчишный. – М.: Машиностроение, 1979. – 80 с.
19. Жегалин, О.И. Снижение токсичности автомобильных двигателей / О.И. Жегалин, П.Д. Лупачев. – М.: Транспорт, 1985. – 120 с.

20. Груданов, В.Я. Физико-химические и теплообменные процессы в каталитических нейтрализаторах с утилизацией теплоты отработавших газов / В.Я. Груданов // Двигателестроение. – 1991. – № 1. – С. 47 – 49.
21. Knacke, O. Thermochemical properties of inorganic substances / O. Knacke, O. Kubaschewski, K. Hesselmann. – 2nd edition. Volumes 1 & 2. – Springer, 1991. – 2500 p.
22. Binnewies, M. Thermochemical data of elements and compounds / M. Binnewies, E. Milke. – 2nd edition. – Wiley-VCH, 2002. – 936 p.
23. Lange's Handbook of chemistry / ed. J. Speight. – 16th edition. – N.Y.: McGraw-Hill Companies, 2005. – 1623 p.
24. Pistorius, C. Phase diagrams of sodium sulfate and sodium chromate to 45 kbar / C. Pistorius // Journal of Chemical Physics. – 1965. – Vol. 43, № 8. – P. 2895 – 2898.
25. Pistorius, C. Phase relations of KClO_4 and KBF_4 to high pressures / C. Pistorius // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1970. – Vol. 31, № 2. – P. 385 – 389.
26. Pistorius, C. Polymorphism and melting of sodium cyanide and thiocyanate to 40 kbar / C. Pistorius, J. Boeyens // Journal of Chemical Physics. – 1968. – Vol. 48, № 3. – P. 1018 – 1022.
27. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов / М.А. Дибиров [и др.] // Журн. прикл. химии. – 1993. – Т. 66, № 6. – С. 1210 – 1216.
28. Pistorius, C. Melting curves and phase transitions of the ammonium halides to 40 kbar / C. Pistorius // Journal of Chemical Physics. – 1969. – Vol. 50, № 3. – P. 1436 – 1442.
29. Klement, W. Solid-to-solid transitions in $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, Rb_2SO_4 , Cs_2SO_4 , Cs_2SeO_4 , and Cs_2CrO_4 / W. Klement, L. Cohen // J. Chem. Thermodynamics. – 1979. – Vol. 11, № 9. – P. 829 – 833.
30. Мальцева, Н.Н. Борогидрид натрия / Н.Н. Мальцева, В.С. Хаин. – М.: Наука, 1985. – 207 с.
31. Feinleib, J. Semiconductor-to-metal transition in V_2O_3 / J. Feinleib, W. Paul // Phys. Rev. – 1967. – Vol. 155, № 3. – P. 841 – 850.

Поступила 21.09.2011

APPLICATION OF POLYMORPHIC CRYSTALLINE SUBSTANCES FOR THERMO- AND CRYOSTATING

YA. SHABLOVSKY

Thermo-chemical properties of inorganic polymorphic crystals enable to create effective accumulators of warmth or accumulators of cold and to provide thermo- or cryostating as well. The most perspective substances, recommended for application as working substances of such devices, are listed, and structural charts of the devices are offered. Namely, we propose two modified constructions of thermal accumulators with stepwise discharge and an universal construction for thermostating/cryostating. A special attention is paid to the substances that are capable to serve as cold-accumulating materials and to provide low-temperature cryostating.

УДК 62-531.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ И ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАГОТОВКИ С РАСПИЛОВОЧНЫМ ДИСКОМ ПРИ СООБЩЕНИИ ЕЙ ДВУХМЕРНОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ

*д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ, канд. техн. наук, доц. А.В. ДРОЗДОВ, Д.А. ЯМНАЯ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Приводится описание методики и оборудования для исследования временных и частотных параметров взаимодействия распиливаемой заготовки в процессе ее двухмерного периодического циркуляционного движения относительно режущего инструмента. Получены экспериментальные зависимости влияния частоты вынуждающих колебаний на продолжительность и периодичность их ударно-фрикционного взаимодействия. На основе сопоставления полученных экспериментальных зависимостей с положениями теории виброударных систем показано, что при прочих равных условиях наличие и направление вращательного движения диска определяют условия и уровень демпфирования в колебательной системе, что в свою очередь оказывает влияние на режим ее работы, в частности на временные и частотные параметры ударно-фрикционного взаимодействия оправки с диском.

Введение. Операция механического распиливания твердых и сверхтвердых кристаллов широко применяется в производстве изделий электронного, оптического и оптико-электронного приборостроения, лазерной техники, в алмазообработке при изготовлении изделий как технического, так и ювелирного назначения. По уровню требований, предъявляемых к этой операции, а также трудоемкости и сложности ее выполнения на первом месте стоит операция механического распиливания монокристаллов алмаза, предназначенная для их разделения на части (полуфабрикаты). Она в значительной степени определяет выход годного алмазного сырья, т.е. массу будущего бриллианта, которая в свою очередь связана кубической зависимостью с его стоимостью.

Несмотря на разработку ряда новых методов разделения монокристаллов алмаза (лазерное, электроэрозионное, электроннолучевое), наибольшее применение благодаря обеспечению высокого процента выхода годного по-прежнему находит метод механического распиливания. Однако ему присущи недостатки, связанные с низкой производительностью процесса и недостаточно высоким качеством поверхности площадок распиленных полуфабрикатов, снижающим процент выхода годного алмазного сырья.

Как показали результаты предшествующих исследований [1], в значительной степени указанные недостатки можно устранить путем сообщения заготовке в процессе распиливания двухмерного периодического циркуляционного движения. При этом рациональным является ее движение по замкнутой траектории, имеющей форму, близкую к эллипсу [2]. В этом случае взаимодействие заготовки с торцевой (режущей) поверхностью распиловочного диска (рис. 1) протекает в условиях периодического ударно-фрикционного взаимодействия.

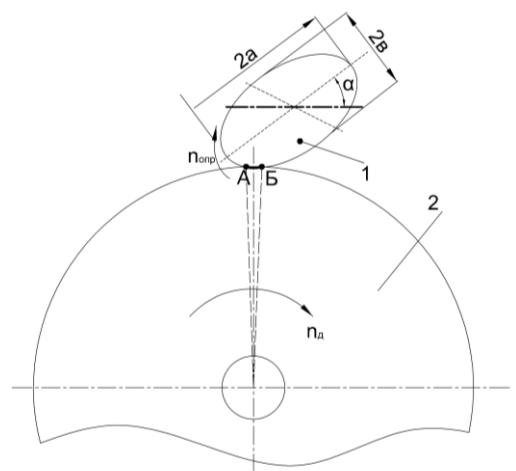


Рис. 1. Схема контактирования точки 1, принадлежащей заготовке, совершающей эллиптическое движение, с поверхностью распиловочного диска 2

Как видно из представленной схемы, на участке траектории движения AB имеет место контактное взаимодействие поверхности заготовки с вращающимся распиловочным диском, а оставшуюся часть траектории она движется, не контактируя с его рабочей поверхностью. При этом если направление движения заготовки по эллиптической траектории (n_3) совпадает с направлением вращения распиловочного диска (n_d), имеет место встречное ударно-фрикционное взаимодействие, а если они имеют противоположное направление – попутное.

Согласно полученным в работе [3] экспериментальным данным, параметрами эллиптического движения заготовки (большой $2a$ и малой $2b$ осями эллипса, углом наклона большой оси α , периодом циркуляционного движения T) можно управлять за счет изменения условий и режимов возбуждения модернизированной распиловочной секции станка модели ШП-2. Очевидно, изменение

параметров эллиптического движения заготовки влечет за собой изменение условий ее ударно-фрикционного взаимодействия с распиловочным диском, в частности, продолжительности контактного

взаимодействия, периода циркуляционного движения заготовки и их соотношения. Поэтому для установления закономерностей процесса распиливания твердых и сверхтвердых кристаллов предложенным способом, а также их математического описания, необходимо располагать данными, отражающими взаимосвязь параметров эллиптического движения заготовки с временными и частотными характеристиками ее контактного взаимодействия с режущей поверхностью диска.

В этой связи целью данной работы явилось исследование временных и частотных параметров контактного взаимодействия заготовки с диском при сообщении ей двухмерного периодического циркуляционного движения.

Методика проведения исследований. Эксперименты выполнялись с использованием модернизированной распиловочной секции станка модели ШП-2, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2.

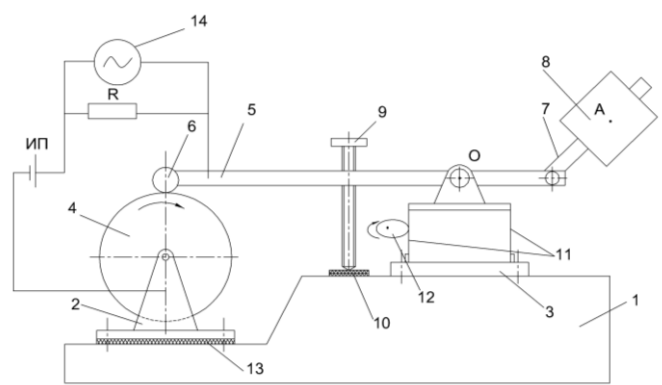


Рис. 2. Принципиальная схема модернизированной распиловочной секции, примененной в исследованиях

Она состоит из массивной чугунной плиты 1, на которой закреплены две пары стоек 2 и 3. В паре стоек 2 устанавливается шпиндель с закрепленным на нем распиловочным диском 4. Вращение шпинделя передается от вала асинхронного электродвигателя посредством плоскоременной передачи (на рисунке не показана). В паре стоек 3 смонтирован узел опоры рычага 5 (стрелы), обеспечивающий его качание с минимальным трением. На одном конце стрелы в специальном приспособлении закрепляется обрабатываемая заготовка 6 (кристалл алмаза), а на другом – смонтирован узел противовеса, включающий поворотный рычаг 7, на котором установлен груз 8.

Статическое усилие прижатия обрабатываемой заготовки к торцевой поверхности распиловочного диска обеспечивается путём придания стреле неуравновешенного состояния за счёт соответствующего изменения положения груза на поворотном рычаге. В рабочем положении стрела поддерживается с помощью регулировочного винта 9, который опирается на резиновую прокладку 10, благодаря чему достигается плавное изменение усилия прижатия заготовки к торцевой поверхности распиловочного диска. По мере увеличения глубины пропила винт периодически выворачивается, чем обеспечивается врезная подача в процессе распиливания.

Принципиальное отличие данной конструкции распиловочной секции от традиционной состоит в том, что узел качания стрелы (пара стоек 3) установлен на плоских пружинах 11, образующих параллелограмный подвес, допускающий перемещение оси качания стрелы вдоль горизонтальной оси. Для сообщения этому узлу вынужденных колебаний применен механический (эксцентриковый) вибратор 12 с приводом от электродвигателя постоянного тока (на рисунке не показан).

В ходе выполнения экспериментов на месте обрабатываемой заготовки закреплялась стальная цилиндрическая оправка диаметром 6 мм, а вместо распиловочного диска (режущего инструмента) устанавливался обычный стальной диск диаметром 80 и толщиной 0,3 мм. Это позволило исключить процесс распиливания, т.е. резания, и тем самым реализовать условия их только ударно-фрикционного взаимодействия.

Для измерения временных и частотных параметров контактного взаимодействия оправки с диском, распиловочная секция оснащалась специальной электрической схемой. Она включала источник питания постоянного тока ИП, один полюс которого подключался к стреле 6, а второй к стойке 2, в которой установлен стальной диск. С помощью диэлектрической (текстолитовой) прокладки 13. Эта стойка электрически изолировалась от основания распиловочной секции, а соответственно, от стрелы с закрепленной на ней стальной оправкой. Благодаря этому электрическая цепь замыкается в момент наступления механического контакта оправки с диском, а в последующий момент его прекращения – она разрывается, что во времени фиксируется с помощью цифрового запоминающего осциллографа 11 модели С9-8, параллельно входу которого включено активное сопротивление R. При этом за счет соответствующей синхронизации

сигнала на экране осциллографа фиксировалось как минимум два соседних периода контактного взаимодействия оправки, совершающей эллиптическое движение, с поверхностью диска.

В качестве примера на рисунке 3 представлены осциллограммы, полученные при контактном взаимодействии оправки с поверхностью неврвращающегося диска (рис. 3, а) и при его вращении (рис. 3, б).

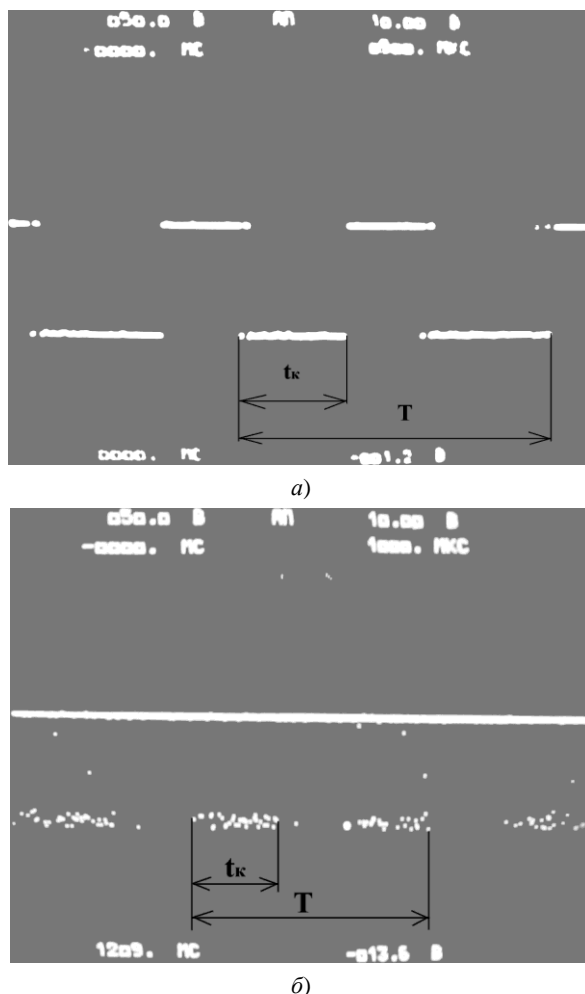


Рис. 3. Примеры осциллограмм, полученных при взаимодействии оправки с поверхностью неподвижного (а) и вращающегося диска (б)

В последнем случае на осциллограмме продолжительность контактного взаимодействия характеризуется наличием на этом участке высокочастотных колебаний, так называемого «дребезга», обусловленных относительным перемещением поверхностей, т.е. наличием скользящего электрического контакта. По результатам расшифровки полученных осциллограмм определялись продолжительность контактного взаимодействия поверхностей t_k и период эллиптического движения оправки T , а по полученным значениям этих параметров рассчитывалась частота периодического движения оправки $f_{оп} = \frac{1}{T}$ и отношение $\frac{T}{t_k} = q$, представляющее собой скважность периодического процесса ударно-фрикционного взаимодействия оправки с диском.

В ходе проведения исследований параллелограмному подвесу стрелы сообщались вынужденные периодические колебания с постоянной амплитудой, равной 3 мм, а их частота изменялась от 2 до 3,6 Гц. В одной серии экспериментов вращение диска отсутствовало, а во второй – ему сообщалось вращательное движение с постоянной частотой 1530 мин⁻¹ при изменении его направления, что позволило реализовать условия как встречного, так и попутного взаимодействия оправки с диском.

На рисунке 4, а представлены экспериментально полученные зависимости периода циркуляционного движения оправки T от частоты вынужденных колебаний f_s , сообщаемых подвесу стрелы.

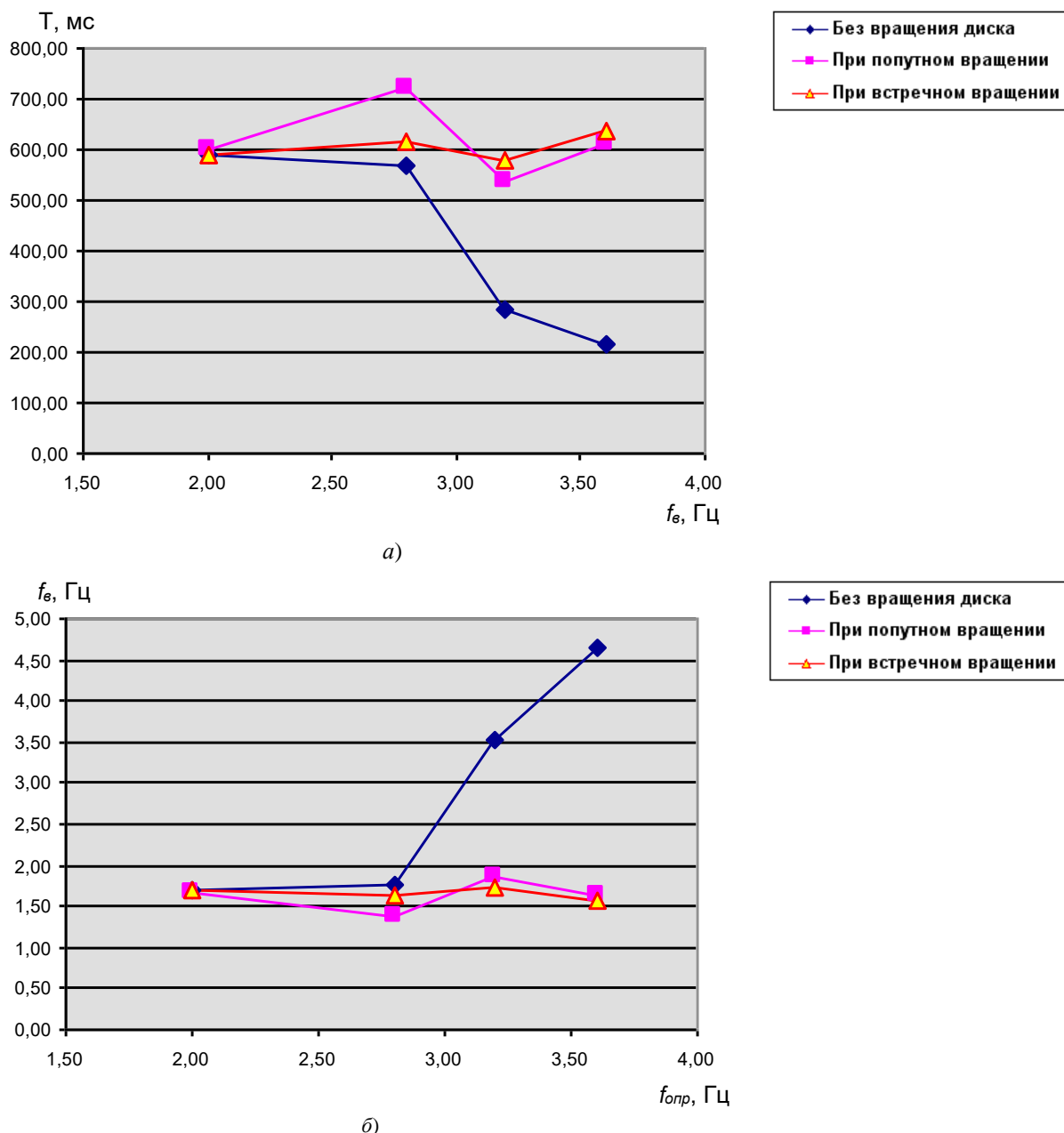


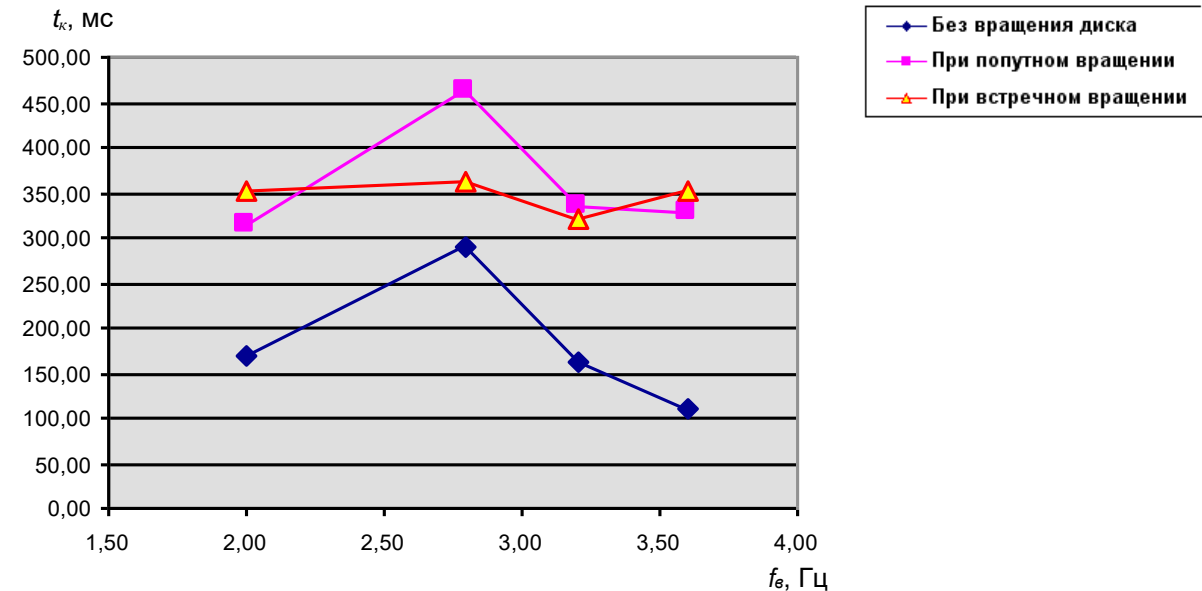
Рис. 4. Зависимость периода циркуляционного движения оправки (а) и частоты этого движения (б) от частоты вынужденных колебаний при различных условиях ее взаимодействия с диском

Из их анализа видно, что при $f_e = 2$ Гц период циркуляционного движения оправки остается практически одинаковым (порядка 600 мс) для всех исследуемых вариантов ее взаимодействия с диском. С увеличением частоты вынужденных колебаний значение T при взаимодействии оправки с неподвижным диском снижается и наиболее интенсивно при f_e , превышающей 2,8 Гц. При их попутном взаимодействии в диапазоне изменения f_e от 2 до 2,8 Гц период циркуляционного движения оправки возрастает, после чего снижается, достигая минимального значения при $f_e = 3,2$ Гц, а при дальнейшем повышении f_e до 3,6 Гц T несколько увеличивается. В случае встречного взаимодействия оправки с диском значение периода ее циркуляционного движения в исследованном диапазоне f_e практически не изменяется.

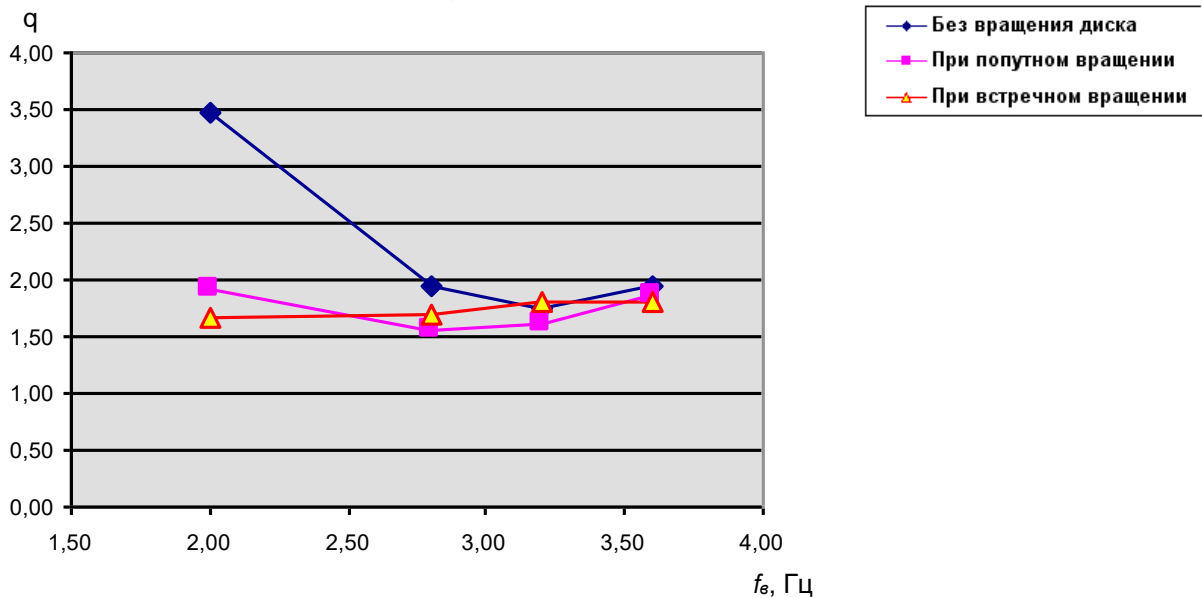
Влияние частоты сообщаемых параллелограмному подвесу вынужденных колебаний на частоту периодического циркуляционного движения оправки $f_{опр}$ отражают зависимости, представленные на рисунке 4, б. Видно, что как при попутном, так и при встречном взаимодействии оправки с вращающимся диском частота ее периодического циркуляционного движения существенно изменяется в исследованном диапазоне варьирования частоты вынужденных колебаний. Причем для указанных вариантов взаимодействия оправки с диском частота ее периодического циркуляционного движения остается ниже частоты f_e во всем диапазоне изменения последней. При взаимодействии оправки с поверхностью неподвижного

диска характер зависимости $f_{опр}(f_{\theta})$ существенным образом изменяется. Так, с увеличением f_{θ} в диапазоне от 2 до 2,8 Гц значение $f_{опр}$ незначительно возрастает, оставаясь меньше частоты вынужденных колебаний. При дальнейшем увеличении f_{θ} имеет место интенсивное, практически линейное возрастание частоты периодического циркуляционного движения оправки, значение которой при $f_{\theta} = 3,6$ Гц составляет 4,64 Гц, т.е. превышает частоту вынужденных колебаний.

На рисунке 5, а представлены зависимости продолжительности контакта t_k оправки с диском за период ее циркуляционного движения от частоты вынужденных колебаний f_{θ} для различных вариантов взаимодействия.



а)



б)

Рис. 5. Зависимость продолжительности контактного взаимодействия оправки с диском (а) и скважности ее периодического циркуляционного движения (б) от частоты вынужденных колебаний при различных условиях ее взаимодействия с диском

Как видно, зависимость $t_k(f_{\theta})$ при взаимодействии оправки с неподвижным диском и при их попутном взаимодействии характеризуется наличием на них четко выраженных экстремумов, соответствующих $f_{\theta} = 2,8$ Гц, при котором продолжительность контактного взаимодействия оправки с диском имеют наибольшее значение. Изменение частоты вынужденных колебаний от этого значения в меньшую или большую сторону приводит к уменьшению параметра t_k , минимальная величина которого имеет место при

наибольшем значении $f_0 = 3,6$ Гц. При попутном взаимодействии оправки с диском продолжительность их контактного взаимодействия оказывается существенно больше, чем при ее взаимодействии с неподвижным диском. В случае их встречного взаимодействия величина t_k практически не зависит от частоты вынужденных колебаний, при этом она превышает продолжительность контакта оправки с неподвижным диском.

Влияние частоты сообщаемых параллелограмному подвесу вынужденных колебаний на скважность периодического ударно-фрикционного взаимодействия оправки с диском отражают зависимости, представленные на рисунке 5, б. Видно, что существенное влияние на значение скважности частота вынужденных колебаний оказывает при взаимодействии оправки с неподвижным диском. В этом случае наименьшей частоте вынужденных колебаний ($f_0 = 2$ Гц) соответствует наибольшее значение скважности ($q = 3,5$). С увеличением f_0 до 2,8 Гц значение скважности резко снижается ($q = 1,9$). Своего минимального значения ($q = 1,75$) она достигает при частоте вынужденных колебаний 3,2 Гц, а затем несколько возрастает ($q = 1,9$) при $f_0 = 3,6$ Гц.

При попутном и встречном взаимодействии оправки с вращающимся диском частота вынужденных колебаний не оказывает столь существенного влияния на скважность, как в предыдущем варианте. Так, при попутном взаимодействии зависимость $q(f_0)$ имеет аналогичный, как при взаимодействии оправки с неподвижным диском характер, но при значительно меньшем диапазоне изменения значения скважности. В случае их встречного взаимодействия частота вынужденных колебаний практически не влияет на значение скважности ($q \approx 1,75$), т.е. продолжительность контакта оправки с поверхностью диска по отношению к периоду ее циркуляционного движения остается величиной постоянной.

Из обобщенного анализа полученных экспериментальных зависимостей следует вывод о том, что при прочих равных условиях существенное влияние на временные и частотные параметры контактного взаимодействия оправки с диском оказывает как наличие его вращательного движения, так и направление последнего, т.е. встречное или попутное. Отметим, что взаимодействие оправки с диском, совершающей эллиптическое циркуляционное движение, при котором большая ось эллипса расположена под углом к горизонтальной оси (см. рис. 1) имеет место их периодическое косое ударно-фрикционное взаимодействие, а поэтому данную систему можно отнести к виброударным [2].

Режим работы таких систем, и в частности продолжительность цикла между соударениями, зависит от потерь энергии при ударе. Применительно к нашему случаю эти потери обусловлены фрикционным взаимодействием поверхностей за время их контактирования, а тогда диссипативное сопротивление (демпфирование в системе) оправданно принять пропорциональным скорости их относительного перемещения. Исходя из этого можно объяснить влияние скорости вращения диска и его направления на временные и частотные параметры контактного взаимодействия с ним оправки. Так, при неподвижном диске скорость их относительного перемещения определяется скоростью эллиптического движения оправки на участке ее контактирования с диском. Поэтому демпфирование в виброударной системе оказывается незначительным, в результате чего временные и частотные параметры взаимодействия оправки с диском существенным образом зависят от частоты вынужденных колебаний, что характерно для систем с малым демпфированием. Для условий попутного взаимодействия оправки с вращающимся диском скорость относительного перемещения за время их контакта будет определяться разностью средней скорости эллиптического движения оправки и окружной скоростью диска. В результате возрастания в сравнении с предыдущим случаем скорости относительного движения взаимодействующих поверхностей за время их контакта увеличивается демпфирование в виброударной системе, обуславливая тем самым меньшую степень влияния частоты вынужденных колебаний на временные и частотные параметры процесса.

При встречном взаимодействии оправки с вращающимся диском скорость их относительного перемещения на участке контактирования имеет наибольшее значение, так как определяется суммой скорости эллиптического движения оправки и окружной скорости диска, а соответственно, имеет место наибольшее демпфирование в виброударной системе, благодаря чему частота вынужденных колебаний практически не влияет на временные и частотные параметры взаимодействия оправки (заготовки) с диском (инструментом).

Таким образом, полученные экспериментальные данные и установленные закономерности влияния скорости и направления вращения диска на временные и частотные параметры взаимодействия с ним оправки, совершающей двухмерное (эллиптическое) циркуляционное движение, дают возможность учесть их при математическом моделировании изучаемого процесса, а также целенаправленно использовать для управления процессом распиливания заготовок из твердых и сверхтвердых кристаллов по предложенной технологической схеме.

Заключение. Разработана методика проведения экспериментальных исследований на модернизированной распиловочной секции станка модели ШП-2, оснащенной специальной электрической схемой, позволяющая определить временные и частотные параметры контактного взаимодействия металлической оправки (аналог заготовки) со стальным диском (аналог инструмента) при сообщении ей двухмерного (эллиптического) циркуляционного движения. С использованием данной методики получены экспериментальные данные, отражающие влияние частоты сообщаемых подвесу стрелы распиловочной секции вынужденных колебаний на продолжительность контактного взаимодействия оправки, совершающей эллиптическое циркуляционное движение, с диском и период (частоту) этого движения, а также его скважность при различных условиях их взаимодействия (при неподвижном диске, при вращающемся диске в условиях встречного и попутного их взаимодействия). На основании анализа этих данных установлено,

что как при попутном, так и при встречном взаимодействии оправки с вращающимся диском частота ее периодического циркуляционного движения $f_{опр}$, а соответственно и его период T существенно не изменяются в исследованном диапазоне варьирования (от 2 до 3,6 Гц) частоты вынужденных колебаний $f_в$. При взаимодействии с неподвижным диском с увеличением $f_в$ от 2 до 2,8 Гц значение $f_{опр}$ незначительно возрастает, оставаясь меньше частоты вынужденных колебаний, а при дальнейшем повышении $f_в$ имеет место интенсивное, практически линейное возрастание частоты периодического циркуляционного движения оправки, значение которой при $f_в = 3,6$ Гц составляет 4,6 Гц, т.е. превышает частоту вынужденных колебаний.

Установлено, что продолжительность контакта t_k оправки с диском за период ее циркуляционного движения, а также его скважность $q = \frac{T}{t_k}$ практически не зависят от частоты вынужденных колебаний в

условиях их встречного взаимодействия. При взаимодействии с неподвижным диском, а также при попутном взаимодействии зависимости $t_k(f_в)$ имеют при $f_в = 2,8$ Гц экстремумы, соответствующие наибольшей продолжительности контактного взаимодействия оправки с диском. Изменение от этого значения частоты вынужденных колебаний в меньшую или большую сторону приводит к уменьшению параметра t_k , который имеет минимальную величину при наибольшем значении $f_в = 3,6$ Гц. В условиях попутного взаимодействия продолжительность контакта с диском при всех значениях $f_в$ оказывается существенно выше, чем при ее взаимодействии с неподвижным диском, а скважность, соответственно, ниже и при меньшем диапазоне ее изменения в пределах варьирования частоты вынужденных колебаний.

На основании качественного анализа условий контактного взаимодействия оправки с диском, совершающей эллиптическое циркуляционное движение, при котором большая ось эллипса направлена под углом к горизонтальной оси, установлено, что в этом случае имеет место их периодическое косое ударно-фрикционное взаимодействие. На основе сопоставления полученных экспериментальных зависимостей с положениями теории виброударных систем, показано, что при прочих равных условиях, наличие и направление вращательного движения диска, в принципе, определяет условия и уровень демпфирования в колебательной системе за счет фрикционного взаимодействия оправки с диском за время их контакта, что в свою очередь влияет на режим ее работы и, в частности, на временные и частотные параметры ударно-фрикционного взаимодействия оправки с диском. Так, при малом демпфировании, что имеет место при неподвижном диске, эти параметры существенным образом и не линейно зависят от частоты вынужденных колебаний. С повышением демпфирования за счет придания диску вращательного движения, обеспечивающего условия его попутного взаимодействия с оправкой, зависимость этих параметров от частоты вынужденных колебаний значительно ослабевает. При встречном взаимодействии вращающегося диска с оправкой, когда демпфирование в системе возрастает еще больше, продолжительность их контактного взаимодействия, частота периодического циркуляционного движения оправки и его скважность практически не зависят от частоты вынужденных колебаний в исследованном диапазоне ее варьирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев, М.Г. Повышение интенсивности и качества распиливания твердых и сверхтвердых материалов путем сообщения заготовке двухмерного циркуляционного движения / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Вестн. БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 36 – 40.
2. Быховский, И.И. Основы теории вибрационной техники / И.И. Быховский. – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.
3. Киселев, М.Г. Установка для распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке периодического циркуляционного движения / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2011. – № 2. – С. 3 – 9.

Поступила 16.01.2012

RESEARCH OF TIME AND FREQUENCY PARAMETERS OF THE CONTACT INTERACTION OF A BLANK PART WITH THE SAWING DISK IN THE TIME OF IMPOSITION OF TWO-DIMENSIONAL PERIODIC CIRCULATING MOTION

M. KISELEV, A. DROZDOV, D. YAMNAJA

The article present a technique and the equipment description for time and frequency interaction parameters research of sawing preparations during its two-dimensional periodic circulating movement concerning the cutting tool. Experimental dependences of compelling fluctuations frequency influence on duration and periodicity of their shock-frictional interaction are received.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 665.7.038:534.838.7:614.872.4

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КАВИТАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

канд. хим. наук, доц. С.В. ПОКРОВСКАЯ,
канд. техн. наук, доц. Н.В. ОЩЕПКОВА, А.В. ЗАВАДСКИЙ, Ю.А. БУЛАВКА
(Полоцкий государственный университет)

Статья посвящена решению проблемы повышения коллоидной стабильности высокощелочных детергентных присадок к смазочным маслам методом ультразвукового диспергирования. Приведены результаты исследования влияния ультразвука определенной частоты на коллоидную стабильность, нейтрализующие и вязкостные свойства коллоидных систем смазочных материалов при различной продолжительности воздействия. Предложено объяснение ультразвукового воздействия на свойства высокощелочных детергентов с позиции физико-химической механики нефтяных дисперсных систем. Изучено влияние исходного сырья и природы конечного продукта на результаты ультразвуковой обработки. Показано, что однородность и чистота исходного сырья оказывают стабилизирующее воздействие на частицы дисперсной фазы коллоидной системы высокощелочных сульфонатных детергентов. Рекомендовано соблюдение превентивных мер и применение средств защиты с целью минимизации потенциального риска негативных последствий для здоровья работающих, вызываемых ультразвуковой обработкой.

Введение. В химической технологии на современном этапе развития достигнуты существенные успехи, однако растущие объемы потребления в качественном и количественном отношении диктуют необходимость в ускорении и интенсификации существующих технологических процессов и внедрении самых передовых научных достижений в технике и технологии. Одним из перспективных направлений развития химической технологии является детальное изучение процессов образования устойчивых коллоидных систем, возникновение эффекта коагуляции в жидкой дисперсной среде под действием ультразвуковых колебаний низкой интенсивности.

Известно, что применение ультразвуковых колебаний позволяет существенно интенсифицировать различные процессы химических технологий, протекающие в жидких средах, а именно: повысить производительность производств, улучшить качество и придать новые свойства конечному продукту [1].

Современные товарные смазочные масла (базовое масло с присадками и накапливающимися в процессе эксплуатации твердыми примесями) представляют собой сложные коллоидные системы, которым присущи многофазность и внутренняя гетерогенность [2]. Вследствие наличия поверхности раздела фаз дисперсные системы в отличие от молекулярных растворов термодинамически и кинетически неустойчивы. Кинетическая (седиментационная) устойчивость определяет способность системы противостоять оседанию частиц дисперсной фазы в определенных условиях под действием силы тяжести.

В процессе эксплуатации двигателя внутреннего сгорания в масле происходит концентрирование продуктов неполного сгорания топлива и окисления масла: смолы, асфальтены, углеродистые частицы, оксикислоты, сажа и др. Эти продукты образуют в масле неустойчивую коллоидную систему, низкая агрегативная устойчивость которой приводит к образованию нагаров на поршнях и пастообразных осадков в картере. Введение в масло высокощелочных карбонатированных детергентных присадок позволяет предотвратить образование отложений загрязнений, их коагуляцию и стабилизировать суспензии загрязнений; при этом присадки адсорбируются на частицах загрязнений и удерживают их в тонкодисперсном состоянии, стабилизация же жидких продуктов происходит в результате солубилизации – растворении в полярных ядрах мицелл присадок. В результате вышеописанных процессов, происходящих в масляном растворе, образуется устойчивая коллоидная система, позволяющая увеличить ресурс выработки масла.

Однако опыт производства и эксплуатации моторных масел показал, что коллоидная стабильность дисперсных систем «базовое масло – высокощелочной детергент» часто не превышает 60...70 %. Изучение стабильности коллоидных дисперсий смазочных материалов является одним из наиболее сложных и наименее изученных процессов. Оно связано с образованием (вследствие адсорбции) молекулярных (в частности, двойных электрических) слоев между дисперсной фазой и дисперсионной средой.

В данной работе предложен метод ультразвукового диспергирования (УЗ) с целью повышения седиментационной устойчивости коллоидной системы «базовое масло – высокощелочной детергент». Механизм воздействия ультразвука на дисперсную фазу связывают с действием на частицы сил гидродинамической природы, на границе раздела фаз гетерогенной системы возникают зоны сжатия и разрежения, которые в свою очередь создают давление. Избыточное давление, создаваемое ультразвуковой волной, накладывается на постоянное гидростатическое давление и суммарно может составлять несколько атмосфер. В фазу разрежения во всем объеме жидкости, особенно у границ раздела фаз, в местах, где имеются мельчайшие твердые частицы, образуются полости (кавитационные пузырьки). При повторном сжатии кавитационные пузырьки захлопываются, развивая давление до сотен атмосфер. Образуется ударная волна высокой интенсивности, которая приводит к механическому разрушению частиц.

Ультразвуковое воздействие на жидкие среды эффективнее высокоскоростного перемешивания и низкочастотной вибрации, что обусловлено возникновением в жидких средах кавитационных парогазовых пузырей, накапливающих энергию при их расширении и взрывающихся при сжатии с созданием ударных волн и кумулятивных струй, формируя микро- и макротечения. Преимуществами воздействия акустических колебаний звуковых или ультразвуковых частот являются: взрыво- и пожаробезопасность процесса; применимость к агрессивным средам; возможность работы при высоких температурах и давлениях [2].

Методы исследований. Для изучения эффективности и целесообразности использования ультразвукового воздействия с целью образования устойчивых коллоидных систем проведены экспериментальные исследования по озвучиванию масляных растворов присадок, производимых СООО «ЛЛК-Нафтан» (сульфонатных ССК-300, С-300 и алкилфенольной В-7120), колебаниями резонансной частоты 22,3 кГц. Обработка смеси производилась продолжительностью от 2 до 20 минут.

Коллоидную устойчивость дисперсной системы определяли фотокалориметрическим методом по методике, приведенной в [3], щелочное число – метод потенциометрического титрования по ГОСТ 11362-96, кинематическую вязкость путем измерения времени истечения определенного объема жидкости под воздействием силы тяжести через калиброванный стеклянный капиллярный вискозиметр по ГОСТ 33-2000.

Результаты и их обсуждение. Результаты определения коллоидной стабильности, нейтрализующих и вязкостных свойств образцов сульфонатных и алкилфенольной присадок, подвергнутых ультразвуковой кавитационной обработке различной продолжительностью, приведены в таблице.

Результаты обработки образцов присадок ультразвуком

Образец, длительность обработки, мин	Коллоидная устойчивость, %		Щелочное число, мг КОН/г		Вязкость кинематическая при 100 °С, мм ² /с	
	исходная	после обработки УЗ	исходная	после обработки УЗ	исходная	после обработки УЗ
С-300	64		302,0		140,4	
2		74		302,1		114,0
5		76		301,6		106,8
10		76		301,8		101,6
15		79		300,9		97,4
20		79		302,2		96,2
ССК-300	68		304,3		56,3	
2		74		301,6		56,4
5		84		300,6		55,3
10		88		303,2		54,6
15		92		304,5		54,4
20		90		304,9		54,3
В-7120	77		210,1		100,3	
2		76		209,7		99,8
5		77		208,9		99,2
10		76		209,3		100,4
15		75		209,2		101,2
20		76		210,4		101,9

На рисунке 1, а приведена зависимость коллоидной стабильности присадок от продолжительности обработки образца ультразвуком, из которой видно, что наиболее восприимчивой к действию озвучивания является сульфонатная присадка ССК-300, синтезированная на синтетической алкилбензолсульфокислоте, причем данная зависимость имеет логарифмический характер ($R^2 = 0,93$). Ультразвуковое воз-

действие способствует увеличению коллоидной стабильности присадки ССК-300 на 13...14 % по отношению к присадке С-300, полученной на основе глубокоочищенного нефтяного сырья.

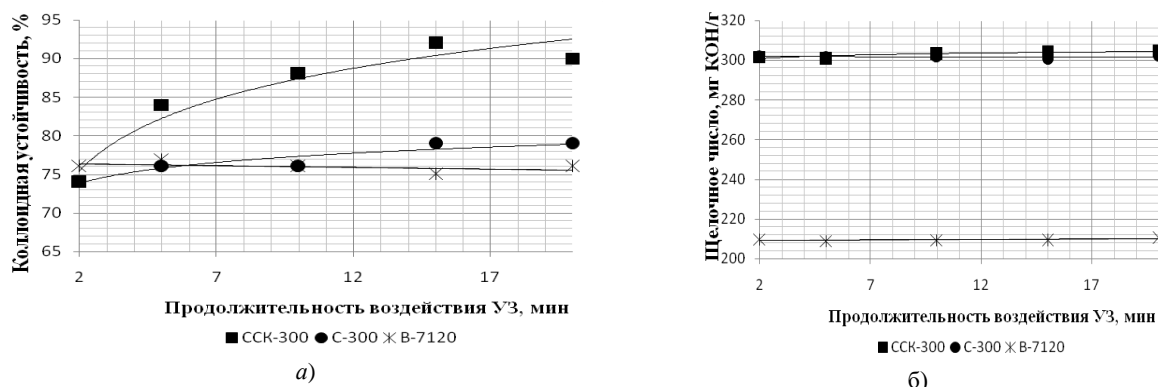


Рис. 1. Зависимость коллоидной стабильности (а) и щелочного числа (б) присадок от продолжительности воздействия ультразвука

Поскольку дисперсная фаза CaCO_3 присадки С-300 стабилизируется более неоднородными по своему составу нейтральными сульфонатами, содержащими в своей структуре ароматические углеводороды I и II группы, плотность и механическая прочность адсорбционно-сольватного слоя сульфонатов в дисперсии CaCO_3 больше, чем для присадки ССК-300, в которой сольватный слой представлен сульфонатом на синтетической основе – алкилбензолсульфонокислоте, характеризующейся химической однородностью. Можно сделать предположение, что повышение коллоидной устойчивости раствора масла с присадкой ССК-300 после ультразвуковой обработки объясняется уменьшением межфазного натяжения частиц дисперсной фазы с дисперсионной средой с изменением характеристик сорбционно-сольватного слоя, что способствует увеличению степени дисперсности частиц дисперсной фазы, а следовательно, увеличению свободной поверхностной энергии и повышению кинетической (седиментационной) устойчивости системы.

Из рисунка 1, б видно, что применение ультразвука не оказывает негативного влияния на нейтрализующие свойства масляных растворов высокощелочных карбонатированных сульфонатных присадок, и как видно из вышепредставленной таблицы, приводит к незначительному изменению вязкостных свойств, не выходящих за пределы требований технических нормативных правовых актов, что важно для качества товарных смазочных масел.

На рисунке 2 представлена принципиальная структура коллоидной дисперсии CaCO_3 , стабилизированная в углеводородах масла анионными поверхностно-активными веществами (ПАВ) типа RX^- . Поверхностно-активные вещества обращены углеводородным радикалом в масло (дисперсионную среду), а полярной частью ориентированы к ядру мицеллы (дисперсной фазе), т.е. образуется «обратная» мицелла.

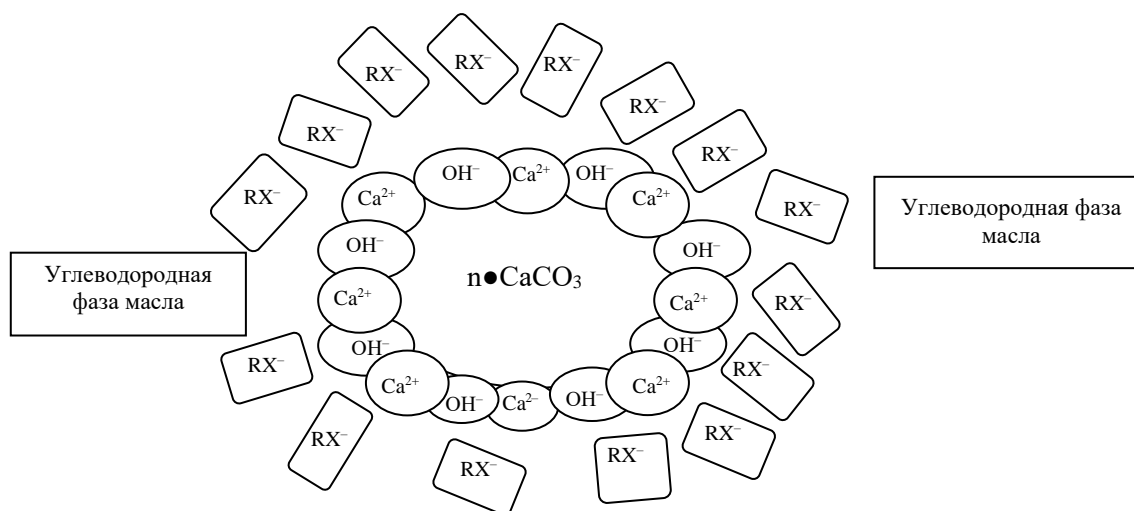


Рис. 2. Схема коллоидной дисперсии CaCO_3

Сравнительный анализ результатов воздействия ультразвуком на сульфонатные присадки показал, что природа сульфоната и параметры его состояния являются важным фактором, влияющим на процесс мицеллообразования высокощелочных сульфонатных присадок в смазочных маслах. Эффективность ультразвукового кавитационного диспергирования, повышающего коллоидную устойчивость присадки ССК-300, обосновывает экономическую и экологическую целесообразность замены нефтяного сырья на синтетическую алкилбензолсульфокислоту.

Оценив результаты воздействия ультразвука на карбонатированную сульфидированную присадку на основе алкилфенолята В-7120 (см. таблицу), можно предположить, что ультразвуковое воздействие не оказывает существенного влияния на коллоидную стабильность системы. Данный факт, возможно, связан с тем, что на поверхности частиц дисперсной фазы присадки В-7120 образуется сорбционно-сольватный слой, обладающий упругостью и механической прочностью, разрушение которого требует значительной энергии и продолжительности воздействия. В процессе синтеза данной присадки в качестве промотора используется спирт, обеспечивающий прочные сольватные оболочки на поверхности частиц CaCO_3 и выступающий в качестве промежуточного стабилизатора; после чего на таких промежуточно стабилизированных коллоидных частицах происходит обменная адсорбция алкилфенолятов кальция, которая приводит к лиофилизации поверхности частиц по отношению к углеводородам и получению углеводородной дисперсии CaCO_3 , стабилизированной адсорбционно-сольватным слоем ПАВ – масло. Структура адсорбирующихся на поверхности CaCO_3 алкилфенолятов приведена на рисунке 3.

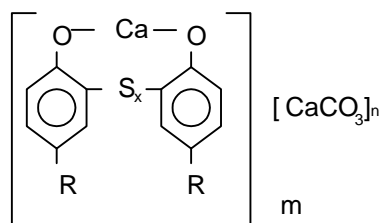


Рис. 3. Структура алкилфенолята

Возможно, воздействие ультразвука в определенной степени дестабилизирует существующие в суспензии мицеллярные структуры высокощелочных карбонатированных алкилфенольных присадок, в результате чего их коллоидная стабильность незначительно ухудшается.

Таким образом, ультразвуковое кавитационное диспергирование является перспективным методом увеличения степени дисперсности коллоидных систем смазочных материалов, однако его применение требует соблюдения ряда мероприятий по сохранению здоровья работающих, поскольку ультразвуковые колебания, генерируемые низкочастотным промышленным оборудованием, оказывают неблагоприятное влияние на организм человека. Длительное систематическое воздействие ультразвука, распространяющегося воздушным путем, вызывает изменения нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем, слухового и вестибулярного аппаратов. Наиболее характерным является наличие вегетососудистой дистонии и астенического синдрома. Степень выраженности изменений зависит от интенсивности и длительности воздействия ультразвука и усиливается при наличии в спектре высокочастотного шума, при этом присоединяется выраженное снижение слуха. В случае продолжения контакта с ультразвуком указанные расстройства приобретают более стойкий характер. Чтобы исключить воздействие ультразвука при контакте с жидкими и твердыми средами, необходимо устанавливать систему автоматического отключения ультразвуковых преобразователей при операциях, во время которых возможен контакт (например, загрузка и выгрузка материалов). Для защиты рук от контактного действия ультразвука рекомендуется применение специального рабочего инструмента с виброизолирующей рукояткой. Если по производственным причинам невозможно снизить уровень интенсивности шума и ультразвука до допустимых значений, необходимо использование средств индивидуальной защиты – противошумов, резиновых перчаток с хлопчатобумажной прокладкой и др. [4 – 5].

Необходимость защиты обслуживающего персонала от воздействия интенсивных звуковых колебаний обусловлено тем, что ультразвуковые колебания непосредственно у источника их образования распространяются направленно, но уже на небольшом расстоянии от источника (25...50 см) происходит переход ультразвуковых колебаний в концентрические волны, заполняя все рабочее помещение ультразвуком и высокочастотным шумом. Однако потенциальный риск негативных последствий влияния данных вредных факторов можно снизить использованием защитных кожухов из листовой стали, снаружи покрытых вибродемпфирующей мастикой, а внутри облицованных матом из сверхтонкого стекловолна толщиной до 30 мм, при этом кожух должен устанавливаться на виброизолирующие прокладки.

В процессе работы ультразвукового генератора, предназначенного для преобразования тока промышленной частоты в ток ультразвуковой частоты и колебательной системы, преобразующей электрическую энергию в энергию механических колебаний и передающей их в технологическую среду, помимо шумового воздействия работник также подвергается воздействию электромагнитного излучения. В качестве защиты от воздействия электромагнитного поля возможно использование поглощающих экранов, в которых применяют материалы, обеспечивающие поглощение излучения соответствующей длины волны. В зависимости от излучающей мощности и взаимного расположения источника и рабочих мест конструктивное решение экрана может быть различным (замкнутая камера, щит, чехол и др.). Для уменьшения просачивания электромагнитной энергии через вентиляционные жалюзи последние экранируют металлической сеткой либо выполняют в виде запердельных волноводов.

Заключение. В результате проведенного исследования изучено влияние низкочастотного ультразвукового кавитационного диспергирования на такие показатели качества сульфонатных и алкилфенольной присадок к смазочным маслам, как коллоидная стабильность, нейтрализующие и вязкостные свойства. Предложено объяснение ультразвукового воздействия на свойства высокощелочных детергентов с позиции физико-химической механики нефтяных дисперсных систем.

Разработаны практические рекомендации и мероприятия по снижению воздействия вредных производственных факторов при внедрении ультразвуковой обработки в технологический процесс. Соблюдение превентивных мер и применение средств защиты позволит минимизировать потенциальный риск негативных последствий для здоровья работников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев // БТИ АлтГТУ. – Бийск, 2007. – 400 с.
2. Главати, О.Л. Физико-химия диспергирующих присадок к маслам / О.Л. Главати, 1989. – 182 с.
3. Методика оценки коллоидной устойчивости присадок и пакетов присадок / разработана С.А. Кирко, М.О. Бабушкин. – СООО «ЛЛК-Нафтан», 2007. – 4 с.
4. Гигиена труда: учебник / под ред. Н.Ф. Измерова, В.Ф. Кириллова. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – 592 с.
5. Челноков, А.А. Охрана труда: учебник / А.А. Челноков, И.Н. Жмыхов, В.Н. Цап; под общ. ред. П.А. Чеботарёва. – Минск: Выш. шк., 2011. – 671 с.

Поступила 26.12.2011

THE ULTRASONIC CAVITATION TREATING OF THE COLLOIDAL SYSTEMS OF THE LUBRICANTS

S. POKROVSKAYA, N. OSHCHERKOVA, A. ZAVADSKY, Y. BULAUKA

The article is devoted to the decision of the problem of colloidal stability increasing of the overbased detergent additives for lubricating oils by means of the Ultrasonic grinding method. There are results of the investigation of ultrasound frequency influence on certain colloidal stability, neutralizing and viscosity properties of colloidal systems and lubricants at various duration of influence. There is an explanation of the ultrasonic influence on the overbased detergent properties from the position of the physicochemical mechanics of petroleum disperse systems science. Raw materials and the nature of the final product impacts on the results of the ultrasonic treatment of the detergent additives have been studied during research. It is shown in the article, that the homogeneity and purity of the raw materials have a stabilizing effect on the disperse phase particles condition for overbased sulfonate detergents. There are some recommendations about the observance of the preventive measures and usage of the protective equipment to minimize the risk of potentially negative consequences for workers' health caused by ultrasound-formation processing.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 674.047

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ СВЧ- И КОНВЕКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ

канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ,
канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ, Ю.В. МАТЕЛЕНКО
(Полоцкий государственный университет)

Исследуется автоматизация системы управления для установки комбинированной сушки древесины СВЧ- и конвекционным нагревом. Описываются основные этапы комбинированной сушки, при которой производится нагрев как СВЧ-полем, так и конвекционным нагревом горячим воздухом. Представлен обзор основных режимов и алгоритмов комбинированной сушки. Предложена схема автоматизации процесса, которая производит контроль параметров и управление системой, обеспечивая оптимальный режим функционирования установки. Описан принцип работы разрабатываемой системы, рассмотрены ее основные элементы, показаны основные преимущества.

Введение. Сушка древесины – сложный процесс, характер которого определяется одновременным протеканием ряда физических явлений, основными из которых являются: передача тепла материалу от агента сушки или источника тепловой энергии – *теплообмен*; перемещение тепла внутри материала – *теплопроводность*; испарение влаги с поверхности материала в окружающую среду – *лагоотдача*; перемещение влаги внутри материала – *лагоперенос* [1]. Роль перечисленных физических явлений применительно к конкретному способу сушки не одинакова. Относительная эффективность того или иного явления зависит от способа передачи тепла древесине и других условий.

Анализ методов и оборудования для сушки древесины показывает, что традиционные методы сушки древесины не обеспечивают в полной мере требуемый уровень качества и характеризуются высокой продолжительностью процесса. Одним из альтернативных направлений является СВЧ-сушка. Однако, как показывают результаты исследований за последние годы, получать высокое качество древесины на практике возможно только совмещая СВЧ-нагрев с конвекционным нагревом или вакуумированием [2].

Для обеспечения определенного режима комбинированной сушки нужно поддерживать требуемые значения температуры и влажности воздуха. Изменение температуры и влажности должно производиться с требуемой скоростью. На каждый этап отводится определенное время [3]. Управление этими параметрами производится исходя из режима сушки.

Автоматизация комбинированной СВЧ-сушки. Процесс сушки пиломатериалов комбинированным СВЧ- и конвекционным нагревом подразделяется на четыре этапа.

Первый этап – пропарка – связан с быстрым СВЧ-нагревом заложенного объема пиломатериалов и находящегося в них объема воды до температуры 55...60 °С, при которой начинается сушка. Одновременно с этим с помощью нагревателя (электрического, водяного или др.) производится конвекционный нагрев воздуха и его циркуляция в объеме камеры сушки при помощи вентиляторов. При этом отсутствует вытяжка и идет увеличение влажности воздуха в сушильной камере до 100 % и более. Это обеспечивает пропарку древесины, что необходимо для снятия имевшихся в древесине напряжений и улучшения теплопроводности поверхностных слоев пиломатериалов.

Второй этап – собственно сушка с выпариванием основной влаги. Сущность этого этапа – удаление интенсивно выделяющейся влаги из пиломатериалов при постоянной температуре 60...70 °С, поддерживаемой нагревателями. Для удаления большого количества выделившейся влаги из камеры работает вентилятор, обеспечивающий вытяжку. Далее начинаются процессы выпаривания влаги из клеточных структур – выпаривание основного объема влаги из слоистых структур древесины. Интенсивность выхода влаги при этом существенно замедляется.

Третий этап – досушка пиломатериалов до заданного порога влажности. Он характеризуется сушкой в жестких режимах, прежде всего температурных. Цель введения таких режимов – эффективное и быстрое удаление клеточной влаги. Для поддержания хорошей теплопроводности поверхностных слоев древесины уровень влажности в сушильной камере должен быть порядка 70 %. С этой целью вентилятор переводится в режим внутренней циркуляции, а температура сушки поднимается на 5...10 °С.

Четвертый этап – охлаждение пиломатериалов до температуры внешней среды. Это производится в режиме циркуляции воздуха от внешней среды при отключенных СВЧ- и конвекционных нагревателях. Разность температур пиломатериалов и внешней среды при выгрузке не должна превышать 20 °С.

Для требуемых режимов и алгоритмов работы без участия человека, а также для достижения более высоких характеристик процесса комбинированной сушки необходима его автоматизация. Для разрабатываемой установки предложена схема автоматизации (рис. 1), которая может обеспечивать измерение температуры и влажности циркулирующего воздуха и древесины. Система управления анализирует полученные от датчиков данные и действует по определенной программе. Пользователем с помощью клавиш управления или же с помощью подключения внешнего компьютера к системе, вводятся параметры сушки: продолжительность каждого из этапов, мощность СВЧ-излучения, скорость нагрева. Имеется возможность управления сушкой в ручном режиме с помощью клавиш управления.

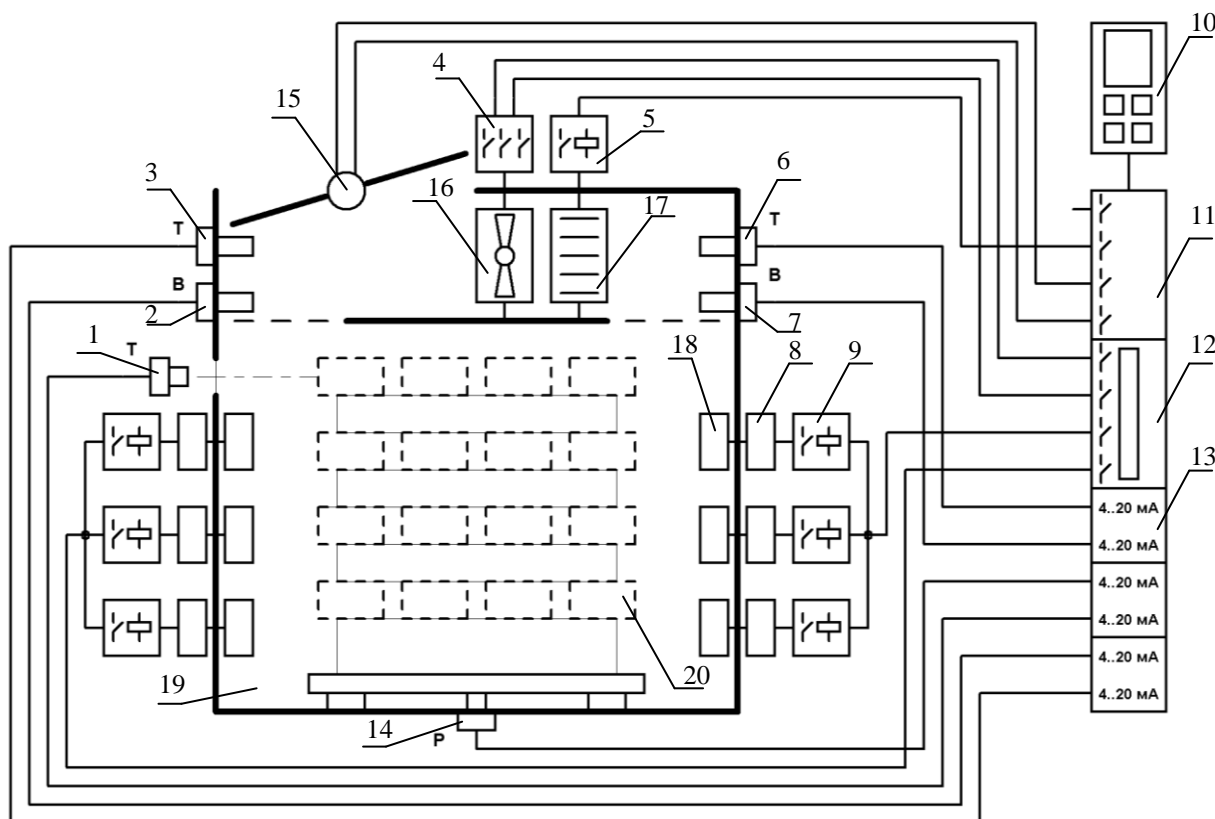


Рис. 1. Функциональная схема автоматизации установки комбинированной сушки СВЧ- и конвекционным нагревом
 Основные элементы схемы: 1 – бесконтактный датчик температуры; 2 – датчик влажности уходящего воздуха;
 3 – датчик температуры уходящего воздуха; 4 – реверсивный пускатель; 5 – силовое реле;
 6 – датчик температуры приходящего воздуха; 7 – датчик влажности приходящего воздуха; 8 – магнетроны;
 9 – промежуточное реле; 10 – модуль индикации и управления «LOGOTD»; 11 – модуль расширения «LOGODM»;
 12 – основной блок контроллера «Siemens LOGO!»; 13 – блок расширения «LOGOAM»;
 14 – датчик давления; 15 – управляемая заслонка; 16 – вентилятор; 17 – конвекционный нагреватель;
 18 – излучатели СВЧ; 19 – камера сушки; 20 – штабель пиломатериалов

Разрабатываемая автоматизированная система управления является модульной, и исходя из потребности пользователя можно подключать модули для измерения тех или иных параметров для управления определенными элементами (генераторами СВЧ, вентиляторами, нагревателем). Анализ полученных данных и управление системой производится с помощью контроллера 12 (см. рис. 1). Контроллер производит управление магнетронами 8, обеспечивающими СВЧ-нагрев, изменяя скважность СВЧ-импульсов, производит включение/выключение нагревателя 17 для конвекционного нагрева горячим воздухом. Циркуляция воздуха обеспечивается реверсивным вентилятором 16, для управления которым задействовано два релейных выхода контроллера. Привод для управления заслонкой 15 также реверсивный и требует два релейных выхода контроллера. Сигналы от датчиков принимаются аналоговыми входами контроллера. В зависимости от конфигурации системы могут подключаться датчики температуры и влажности древесины подводимого и отводимого из камеры воздуха, поэтому количество требуемых аналоговых входов может изменяться.

В данной системе управления используется контроллер «Siemens LOGO» (рис. 2) [4], так как он позволяет выполнять требуемые функции: работу по определенному алгоритму, выполнение временных задержек, логических операций, измерение и обработку сигналов от датчиков, управление устройствами с помощью релейных выходов. «Siemens LOGO» построен по модульному принципу – к основному блоку «LOGO» 12 исходя из потребностей системы подключаются модули расширения релейных входов/выходов «LOGODM» 11 и аналоговых входов/выходов «LOGOAM» 13. Также возможно подключение модуля индикации и управления «LOGOTD» 10, который позволяет вынести элементы управления на панель щита автоматизации. Модульность дает возможность конфигурировать систему управления сушкой исходя из потребностей заказчика.

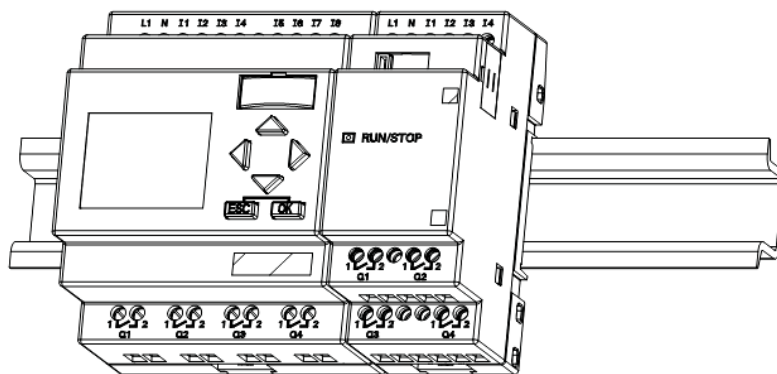


Рис. 2. Контроллер «Siemens LOGO»

Основной модуль контроллера «LOGO» имеет 8 цифровых входов и 4 релейных выхода. В данной схеме используются 4 релейных выхода. Однако в схеме требуются 8 управляющих реле, поэтому к основному блоку подключается блок расширения «LOGODM» на 4 релейных выхода. Таким образом, с помощью 8-ми управляющих реле обеспечивается управление генераторами СВЧ, заслонкой, вентиляторами, нагревателем. Однако этот модуль «LOGO» не имеет аналоговых входов/выходов, поэтому для принятия сигналов от датчиков температуры и влажности применяются модули расширения «LOGOAM». В предложенной схеме количество требуемых аналоговых входов может достигать 6-ти, следовательно, требуется 3 модуля расширения по 2 входа. Для передачи сигнала на аналоговые входы используется токовая петля 4...20 мА.

Для обеспечения индикации информации и управления процессом в ручном режиме к основному модулю подключается модуль индикации и управления «LOGOTD». Этот модуль выносится на панель управления щита автоматизации. Модуль имеет дисплей, на котором отображаются измеряемые параметры сушки, а также другая необходимая информация. Имеются клавиши управления, с помощью которых вводятся параметры процесса, выбирается нужный режим сушки. Выбор просмотра показаний датчиков также осуществляется с помощью клавиш управления. Следует отметить, что в качестве основного модуля контроллера можно использовать специальный основной модуль «LOGO! 24RC», имеющий средства управления и индикации. Такой способ более простой, однако менее удобен при эксплуатации.

Для измерения температуры и влажности древесины, а также циркулирующего воздуха существует несколько способов, в зависимости от потребностей пользователя. Измерение температуры и влажности циркулирующего воздуха возможно производить вне камеры сушки, где СВЧ-излучение достаточно ослаблено. Датчики для измерения температуры 6 и влажности 7 подводимого в камеру воздуха показаны на рисунке 1. Эти датчики также используются для измерения температуры и влажности воздуха при закрытой циркуляции в режиме пропарки. Аналогичные датчики 2, 3 предназначены для измерения температуры отводимого из сушильной камеры воздуха. Измерение влажности воздуха затруднено высокой температурой процесса сушки, поэтому используется высокотемпературный датчик CallTec-MelaFZC 3/5 [5]. Датчик способен работать при температуре до 200 °С, обладает устойчивостью к конденсату, долговременной стабильностью, имеет выходной сигнал 4...20 мА. Температура в разрабатываемой системе измеряется датчиком TC5008 [6], позволяющим измерять температуры от минус 50 °С до плюс 400 °С и имеющим токовый выход 4...20 мА. Датчики влажности и температуры устанавливаются в потоке сушильного агента в зоне, где его параметры соответствуют средним величинам.

Чтобы измерить температуру и влажность накладными датчиками, требуется помещать их в камеру сушки. При таком измерении температуры и влажности древесины возникают некоторые сложности. Они вызваны тем, что датчики некорректно работают в мощном СВЧ-поле, а также вносят изменения в распределение СВЧ-поля [7]. Поэтому предлагается измерять температуру бесконтактным методом с

помощью пирометра *I*, измеряющего среднюю температуру штабеля по интенсивности инфракрасного излучения через специальное смотровое окно. Этот датчик «смотрит» на древесину через окно, экранирующее СВЧ-излучение, но пропускающее инфракрасное излучение, и измеряет температуру древесины. В качестве бесконтактного датчика используется пирометр RaytekThermalertMID [8], позволяющий измерять температуру от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ на требуемом расстоянии и имеющий выходной сигнал $4\text{...}20\text{ мА}$. Возможная сложность, связанная с таким измерением, – неравномерное распределение температуры по всему объему древесины, однако при небольшой загрузке камеры такой способ эффективен.

Измерение влажности древесины предлагается проводить по косвенному признаку – весу. Зная начальный вес древесины и вес древесины на любом этапе сушки, можно определить, сколько влаги испарилось на данном этапе. Для этого под штабелем располагаются своеобразные весы, которые системой рычагов связаны с датчиком давления *I4*, который находится вне сушильной камеры. В качестве измерителя давления используется любой датчик, подходящий по конструкции и диапазону давления в зависимости от конструкции весов. Датчик должен иметь выход $4\text{...}20\text{ мА}$. Все датчики подключаются к аналоговым входам управляющего контроллера. Благодаря передаче сигнала по стандарту $4\text{...}20\text{ мА}$ контроллер может размещаться на значительном расстоянии от камеры сушки.

Управление исполнительными элементами (магнетронами, вентилятором, нагревателем, заслонкой) осуществляется с использованием релейных выходов контроллера. Так как управляемые элементы силовые и имеют относительно высокую потребляемую мощность, то к релейным выходам контроллера подключены усилительные элементы, которые способны коммутировать более высокую мощность, чем контроллер.

В качестве генераторов СВЧ используются магнетроны с потребляемой мощностью около киловатта, объединенные в две группы, для одно- и двухстороннего облучения материала. В системе предусмотрено раздельное управление магнетронами, подающими СВЧ-энергию излучателям каждой из групп. На каждый магнетрон предусмотрено собственное реле *9*, способное коммутировать переменное напряжение и ток. Используется реле на напряжение $\sim 220\text{ В}$ и ток 16 А модели РК-1Р [9]. Катушки реле для магнетронов каждой группы соединены параллельно, что обеспечивает управление группой магнетронов с помощью одного релейного выхода контроллера. Для питания установки планируется использовать трехфазную линию, так как мощности одной фазы может быть недостаточно для питания всех магнетронов установки. Использование собственного промежуточного реле на каждый магнетрон позволяет питать каждый магнетрон от определенной фазы, тем самым распределяя потребляемую мощность установки по трем фазам. Регулирование мощности излучения производится при помощи изменения скважности СВЧ-импульсов. Изменение скважности регулируется в пределах от нескольких секунд до десятков минут. Обе группы магнетронов могут включаться как одновременно, так и по отдельности.

В качестве вентилятора для циркуляции воздуха используется трехфазный вентилятор. При управлении необходимо обеспечить реверсивность его вращения. Для обеспечения этого требования используется реверсивный пускатель *4* типа ПБР-12А [10]. Этот пускатель позволяет управлять вентилятором трехфазного напряжения с потребляемой мощностью до $5,5\text{ кВт}$. При этом задействованы два релейных выхода контроллера, пускатель управляется напряжением от 10 до 50 В .

Управление нагревателем зависит от типа нагревателя. Если используется электрический нагреватель, то управление производится одним релейным выходом контроллера через промежуточное реле. Потребляемая мощность электрического нагревателя может достигать несколько киловатт, поэтому в качестве промежуточного реле необходимо использовать силовое реле *5* типа 04050 20А 2р 220В [11]. Если нагреватель водяной, то регулировка температуры теплообменника регулируется с помощью трехпозиционного клапана, который управляет подачей приточной воды. Привод клапана имеет малую потребляемую мощность, и поэтому управляется напрямую от релейных выходов контроллера. Используется два релейных выхода: для открытия и закрытия клапана. Используется двухходовой клапан модели с электроприводом. Электропривод трехпозиционный с рабочим напряжением $\sim 220\text{ В}$ и потребляемой мощностью 6 Вт .

Регулируемая заслонка в процессе сушки в зависимости от этапа работы установки должна открываться и закрываться. Она приводится в движение с помощью специального электропривода Siemens GDB336.1E [12]. Это трехпозиционный привод с рабочим напряжением $\sim 220\text{ В}$ и потребляемой мощностью 2 Вт . В приводе имеется возможность настроить максимальный угол поворота. Данный привод имеет встроенные концевые выключатели, что позволяет задействовать для его управления два релейных выхода контроллера. Привод имеет малую потребляемую мощность, поэтому подключается к контроллеру без промежуточных реле.

Вся система управления монтируется в щит автоматизации, который располагается на требуемом расстоянии от самой установки. Это обеспечивает удобство и безопасность эксплуатации установки. Установка, для которой разрабатывается система управления, является модульной и может наращиваться дополнительными камерами сушки. Все модули управляются одной системой управления – основным блоком контроллера «LOGO!», производящим обработку показаний датчиков и управление системой.

При наращивании дополнительных камер сушки для управления этими камерами к модулю «LOGO!» подключаются дополнительные блоки расширения аналоговых входов и релейных выходов. Эти блоки могут размещаться как в общем щите автоматизации, так и в собственном щите для каждого модуля сушильной камеры.

Заключение. Автоматизация системы позволяет осуществлять сушку древесины с минимальным участием оператора, при этом результаты процесса сушки более высокие: повышается качество продукции, уменьшаются временные и энергозатраты, повышается удобство эксплуатации системы. Теоретические результаты, а также результаты, получаемые опытным путем в процессе сушки, позволяют подобрать оптимальные режимы работы системы. При необходимости можно перепрограммировать систему на нужный режим или подкорректировать параметры. Разрабатываемая система автоматизации является модульной и при необходимости может быть усовершенствована или упрощена, может быть быстро дополнена блоками для управления дополнительными сушильными камерами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способы сушки древесины/Web-страница компании «Ксирон холод»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.xiron.ru/content/view/30396/95/>. – Дата доступа: 05.01.2012.
2. Кизина, О.А. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины / О.А. Кизина, А.Л. Адамович, Ю.Г. Грозберг // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 3. – С. 32 – 37.
3. Морозов, Г.А. Микроволновые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: современные достижения и новые подходы / Г.А. Морозов // Материалы науч.-техн. конф. – Казань, 2000. – С. 1 – 10.
4. Логические модули Siemens LOGO/Web-страница компании «Siemens»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <https://www.cee.siemens.com/web/ua/ru/iadt/ia/AS/PLC/Pages/LOGO.aspx>. – Дата доступа: 06.01.2012.
5. Датчики влажности ZC, ZC.D, KC/Web-страница компании «CallТec+Mela»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://www.melasensor.ru/dat_kc_gc_zc.htm. – Дата доступа: 06.01.2012.
6. Датчики температуры ТС5008/Web-страница компании ОАО «Манотом»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.manotom-tmz.ru/catalog/item-100-ts5008.html>. – Дата доступа: 07.01.2012.
7. Валитов, Р.А. Измерение на миллиметровых и субмиллиметровых волнах / Р.А. Валитов, С.Ф. Дюбко, Б.И. Макаренко. – Радио и связь, 1984. – 296 с.
8. Бесконтактный датчик температуры Raytek Thermalert MID/Web-страница компании ООО «Город Инструмента»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://www.sensoren.ru/beskontaktnie_datchiki_temperaturi_raytek_thermalert_mid_pirometri.html. – Дата доступа: 07.01.2012.
9. Электромагнитное реле РК-1Р/Web-страница компании ООО «Электротехнологии»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://www.eltehno.ru/index.php?page=prod&part=3_3_15_1. – Дата доступа: 07.01.2012.
10. Пускатель реверсивный ПБР-12А/Web-страница компании ООО «НПФ «Битек»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.bitek-e.ru/pbr.htm>. – Дата доступа: 07.01.2012.
11. Реле силовое 04050 20А 2р 220В/ Web-страница компании «Комэлектро»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://com-electro.ru/product11287>. – Дата доступа: 08.01.2012.
12. Привод SIEMENS GDB/Web-страница компании «АВ Автоматика»/ [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: <http://www.av-avtomatika.ru/catalog/207.htm>. – Дата доступа: 08.01.2012.

Поступила 24.01.2012

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR WOOD DRYING PLANT WHICH COBMBINES MICROWAVE AND CONVECTION HEATING

Y. MATELENOK, A. ADAMOVICH, Y. GROZBERG

The article is about working out an automatic control system of a wood drying plant using both microwave and convection heating. The article describes the main stages of combined drying when there is usage of microwave heating and convection heating by hot air. There is the scheme of automation of the process, which provides control of all the parameters and system control, so it guarantees optimum performance of the drying plant. The main principle of operation of this system is described in details. The main advantages of this system are mentioned.

УДК 533.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ НА ЛОКАЛЬНУЮ ХИМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ПЛАЗМЫ СВЧ-РАЗРЯДА**д-р техн. наук С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО****(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)**

Исследуются скорости СВЧ-плазмохимического удаления фоторезистивных пленок с поверхности кремниевых пластин в зависимости от формы и частоты следования импульсов выходных сигналов анодного напряжения и тока источника вторичного электропитания СВЧ-магнетрона, построенного на базе высоковольтного трансформатора, работающего в режиме насыщения. Рассматривается влияние различного количества объектов обработки, расположенных в объеме разрядной камеры, на скорость плазмохимического удаления фоторезистивных пленок с поверхности кремниевых пластин. Установлена возможность стабильной и устойчивой работы низкодобротного СВЧ-магнетрона непрерывного действия (типа М-105, М-112) на плазменную нагрузку с упрощенными схемами питания выпрямленным нефильтрованным напряжением с частотой следования электрических импульсов 50 и 100 Гц. Определена более высокая (в 1,3 раза) эффективность применения для целей СВЧ-плазмохимической обработки полупроводниковых пластин 100-герцовой схемы питания СВЧ-магнетрона с умножением анодного напряжения по сравнению с 50-герцовой при одинаковых величинах потребляемой источниками питания электрической мощности. Установлен эффект влияния на скорость процесса плазменного удаления фоторезистивных пленок с поверхности полупроводниковых пластин задержки начала плазмообразования по отношению к началу генерации магнетроном СВЧ-мощности.

Введение. В процессе проведения экспериментов по удалению фоторезиста с поверхности кремниевых пластин при групповой обработке установлен специфический характер проявления эффекта «загрузки». Это является следствием как частичного поглощения поступающей в область СВЧ-резонатора мощности электромагнитной волны материалом с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь (кремний), так и изменением добротности резонатора. Поэтому по мере увеличения количества обрабатываемых в камере плазмотрона полупроводниковых пластин необходимо увеличивать мощность подводимого СВЧ-излучения. Поскольку СВЧ-магнетроны средней мощности технологического назначения имеют максимальную мощность порядка 0,8...1,5 кВт, возникает необходимость поиска стимулирующих воздействий на процесс групповой СВЧ-плазмохимической обработки материалов.

Методика эксперимента. Применительно к задаче исследования влияния режимов плазмообразования на локальную химическую активность СВЧ-плазмы экспериментально проводилось изучение процесса удаления фоторезистивного защитного покрытия ФП-15 толщиной 1,5 мкм, нанесенного на кремниевые (Si) пластины диаметром 76 мм. Технологические параметры процесса удаления фоторезистивных пленок с поверхности подложек изучались при питании магнетрона анодным током с частотой импульсов 50 и 100 Гц.

При проведении экспериментов питание магнетрона осуществлялось от источника вторичного электропитания на базе высоковольтного трансформатора, работающего в режиме насыщения. Отличительными характеристиками при организации процесса обработки являлись особенности схмотехнического построения выходного высоковольтного выпрямительного каскада источника питания [1]:

1) источник питания собран по схеме выпрямления с удвоением напряжения с использованием в своем составе трансформатора, работающего в режиме насыщения, что позволяло получить форму импульса анодного напряжения, близкую к прямоугольной форме при величине потребляемой установкой мощности 1300 и 1650 Вт;

2) источник питания магнетрона собран по схеме двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения с использованием в своем составе трансформатора, работающего в режиме насыщения, что позволило получить форму анодного напряжения, близкую к постоянной. Такие схмотехнические решения обеспечивали работу магнетрона в режиме формирования амплитудно-модулированного СВЧ-излучения с частотой следования пачек импульсов 50 и 100 Гц.

Процесс удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин контролировался с использованием спектрометра по интенсивности линии кислорода с длиной волны 777,76 нм. Эксперименты по удалению фоторезиста проводились в атмосфере воздуха и O₂.

Результаты и их обсуждение. Известно, что при взаимодействии кислородной плазмы с фоторезистом последний в результате ряда превращений переходит в газообразные продукты CO, CO₂, H₂O и др. [2], которые повышают давление в реакционной камере и снижают скорость удаления фоторезиста. При повышении давления относительно p_{opt} снижение скорости удаления можно объяснить уменьшением энер-

гии электронов в результате повышения частоты столкновения частиц в объеме разряда, что выражается в снижении степени диссоциации молекул кислорода. С давлением газа однозначно связан и расход газа, так как при неизменной скорости откачки с повышением расхода газа увеличивается давление в реакторе, и наоборот. В случае если при одном и том же давлении имеется возможность изменения расхода газа, то и этот параметр имеет свое оптимальное значение (максимум), которое обусловлено временем контакта плазмы с пленкой фоторезиста и явлениями «застоя» отработанных газообразных фракций.

На рисунке 1 и рисунке 2 представлены результаты исследования влияния давления в разрядной камере СВЧ-плазмотрона на скорость удаления фоторезиста с поверхности двух кремниевых пластин в воздухе (рис. 1) и O_2 (рис. 2) при использовании в источнике питания магнетрона различных схем выпрямления анодного высоковольтного напряжения [3].

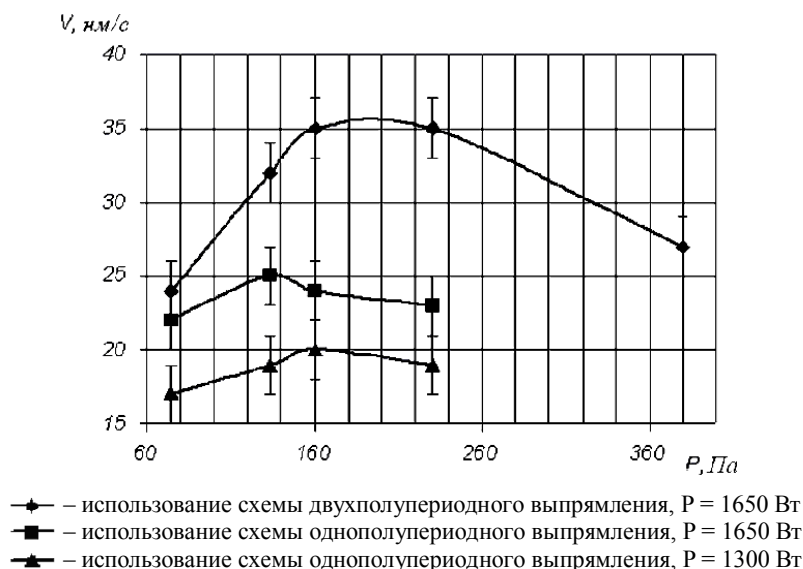


Рис. 1. Влияние величины давления воздуха в разрядной области на скорость удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин для различных источников питания СВЧ-магнетрона



Рис. 2. Влияние величины давления O_2 в разрядной области на скорость удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин для различных источников питания СВЧ-магнетрона

При использовании в источнике питания в качестве выходного каскада схемы однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения для давлений выше 230 Па наблюдалась неустойчивость разряда.

В таблице 1 приведены обобщенные данные по удалению фоторезиста с поверхности двух кремниевых пластин в атмосфере воздуха и O_2 при давлении в разрядной камере 133 Па [4]. Более высокие скорости протекания процесса плазменного удаления фоторезистивных пленок в разряде O_2 по сравнению с

обработкой в плазме воздуха являются характерными и для обработки в других типах разряда [5 – 7] по причине более высокой концентрации в кислородной плазме химически активных по отношению к органическим молекулярным соединениям частиц.

Результаты экспериментов

Схематическое решение выходного высоковольтного каскада источника питания СВЧ-магнетрона	Потребляемая мощность, Вт	Интенсивность спектральной линии кислорода ($\lambda = 777,76$ нм), отн. ед.	Скорость удаления фоторезиста в среде, нм/с	
			воздух	кислород
Однополупериодное выпрямление	1300	2150	19 ± 2	27 ± 2
	1650	1800	25 ± 2	34 ± 2
Двухполупериодное выпрямление	1650	100	32 ± 2	42 ± 2

Анализ данных таблицы 1 показал, что технологическим фактором, влияющим на скорость удаления фоторезиста, служит мощность СВЧ-колебаний, подводимых к разряду. Величина вкладываемой в разряд мощности как основной энергетический параметр активно влияет на условия в плазме. С изменением мощности изменяются электрофизические характеристики плазмы, что сказывается как на абсолютных, так и на относительных скоростях травления материалов. Так же как и для ВЧ-разряда, рост мощности приводит к ускорению процесса, что обусловлено повышением степени ионизации и температуры частиц плазмы.

Установлено, что максимальная скорость удаления фоторезиста в проведенных экспериментах достигается при использовании источника питания СВЧ-магнетрона, построенного по схеме двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения, и составляет величину порядка 40...44 нм/с. Это можно объяснить тем, что при одинаковой потребляемой электрической мощности в случае 100-герцовой частоты следования пачек СВЧ-импульсов скорости процессов выше, а вероятность гибели электронов и нейтрализации химически активных плазменных частиц ниже, чем для 50-герцовой частоты.

При данных электрических параметрах источника питания также изменяются физические характеристики плазмы и создаются условия, при которых не вся вкладываемая в разряд СВЧ-мощность затрачивается на поддержание СВЧ-разряда, а часть ее расходуется на разогрев кремниевой пластины и, следовательно, фоторезиста, что приводит к увеличению скорости удаления.

Экспериментально установлено, что в случае запаздывания момента возбуждения СВЧ-разряда в разрядной камере по отношению к началу генерирования СВЧ-магнетронного электромагнитного излучения на 4...5 секунды при питании его по схеме двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения скорость удаления фоторезиста возрастает до 60 нм/с. Предполагается, что при таких условиях СВЧ-плазменной обработки высокая скорость удаления фоторезиста обусловлена тем, что мощность СВЧ-электромагнитной волны на этапе бесплазменной обработки поглощается материалом пластин кремния, имеющим высокое значение тангенса угла диэлектрических потерь, что приводит к интенсивному разогреву как самих пластин, так и фоторезистивной пленки.

Как показали эксперименты, увеличение мощности потребляемой установкой с 1300 до 1650 Вт при использовании источника питания СВЧ-магнетрона, собранного по схеме однополупериодного выпрямления с удвоением напряжения при оптимальном давлении для плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин $P = 133$ Па, ведет к повышению скорости удаления на величину, пропорциональную коэффициенту увеличения мощности (в данном случае $k = 1,3$).

Данные экспериментов по обработке одиночных пластин и партий пластин показали на высокую воспроизводимость результатов обработки в кислородной плазме СВЧ-разряда при поддержании одинаковых технологических условий проведения процесса. Разброс времени обработки не превышал 5 %.

Использование схемы двухполупериодного выпрямления с удвоением анодного напряжения СВЧ-магнетрона приводит к увеличению скорости удаления фоторезиста в 1,3 раза по сравнению с использованием схемы однополупериодного выпрямления при одинаковых отбираемых из питающей из энергосети мощностях.

На рисунке 3 представлен график изменения скорости удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин диаметром 76 мм при обработке одновременно в камере от 1 до 9 пластин при питании магнетрона по схеме одно- и двухполупериодного выпрямления с удвоением напряжения с использованием в составе источника трансформатора, работающего в режиме насыщения. Рабочий газ – воздух.

Скорость удаления фоторезиста снижается с увеличением обрабатываемых образцов в камере плазмотрона, что видно из рисунка 3. Это можно объяснить также проявлением эффекта «загрузки». При взаимодействии группы пластин с плазмой существенным фактором является площадь, занимаемая пла-

стинами относительно объема реактора (его поперечного сечения и длины). Ранее установлено [1; 8], что увеличение числа пластин в реакторе снижает скорость удаления фоторезиста, это обнаружено и в наших экспериментах (рис. 3). При этом «загрузочная кривая» для СВЧ-плазмохимической обработки имеет такой же вид, как и для ВЧ-объемных систем [9], что позволяет сделать следующий вывод: в обоих случаях действует сходный механизм деструкции органических соединений, состоящий в разложении сложных молекулярных соединений в процессе взаимодействия с активированным кислородом на CO , CO_2 , H_2O .

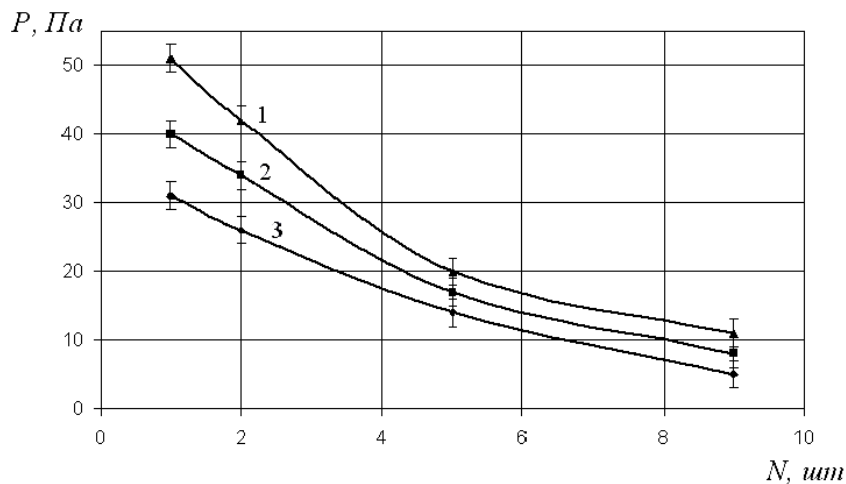


Рис. 3. Зависимость скорости удаления фоторезиста от количества пластин (1...9 шт.) в камере плазмотрона:

- 1 – использование схемы двухполупериодного выпрямления, $P = 1650$ Вт;
- 2 – использование схемы однополупериодного выпрямления, $P = 1650$ Вт;
- 3 – использование схемы однополупериодного выпрямления, $P = 1300$ Вт

Изучение характера удаления фоторезиста при различном расположении пластин относительно газового потока показало, что процесс обработки происходит быстрее и более равномерно при продольном (по отношению к газовому потоку) размещении пластин. Это говорит о том, что организация движения газового потока в зоне обработки пластин играет для СВЧ-разряда также существенную роль.

Заклучение. В результате проведенного исследования установлена возможность стабильной и устойчивой работы низкочастотного СВЧ-магнетрона непрерывного действия (типа М-105, М-112) на плазменную нагрузку с изменяющимися параметрами и в условиях отсутствия в волноводном тракте устройств защиты от отраженной СВЧ-мощности с упрощенными схемами питания выпрямленным нефильтрованным напряжением. При питании СВЧ-магнетрона анодным током с частотой следования импульсов 50 и 100 Гц состав и интенсивность активных частиц и продуктов реакций в плазменном объеме существенно не изменяются.

Установлены закономерности влияния давления плазмообразующего газа, величины подводимой к разряду СВЧ-мощности, частоты следования электрических импульсов источника питания СВЧ-магнетрона, количества одновременно обрабатываемых кремниевых пластин на скорость удаления фоторезиста с их поверхности в объеме СВЧ-разряда в атмосфере кислорода и воздуха, возбуждаемого в плазмотронах резонаторного типа с частичным заполнением плазмой резонирующего объема. Установлена более высокая (в 1,3 раза) эффективность применения для целей СВЧ-плазмохимической обработки полупроводниковых пластин 100-герцовой схемы питания СВЧ-магнетрона с умножением анодного напряжения по сравнению с 50-герцовой при одинаковых величинах потребляемой источниками питания электрической мощности.

При увеличении количества одновременно обрабатываемых в камере плазмотрона кремниевых пластин обнаружено специфическое проявление эффекта «загрузки» камеры, что является следствием как эффекта частичного поглощения поступающей в область СВЧ-резонатора мощности электромагнитной волны материалом с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь (кремний), так и изменения добротности резонатора и условиями согласования разрядной области с волноводным трактом, что приводит к снижению эффективности проведения процессов СВЧ-плазмохимического удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин. Этот эффект наряду с эффектом проникновения СВЧ-поля в объем зоны разряда необходимо учитывать при организации процессов СВЧ-плазмохимической обработки и анализе результатов обработки материалов и структур, подверженных воздействию СВЧ-энергии.

Выяснено, что повышение количества кремниевых пластин может приводить к проявлению сильной нестабильности разряда и даже к погасанию.

Установлен эффект влияния на скорость процесса плазменного удаления фоторезистивных пленок с поверхности полупроводниковых пластин задержки начала плазмообразования по отношению к началу генерации магнетроном СВЧ-мощности. Это может быть объяснено поглощением мощности СВЧ-электромагнитной волны материалом пластин кремния в период отсутствия плазмы, в результате чего происходит их интенсивный разогрев, который значительно активизирует последующий этап плазмохимической обработки материала на их поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордусов, С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С.В. Бордусов; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. Масс-спектрометрический анализ процесса удаления фоторезиста в плазме кислорода / Б.Л. Толстых [и др.] // Электронная техника. Сер. 7. Технологии, организация производства и оборудование. – 1978. – Вып. 1(86). – С. 39 – 43.
3. Bordusau, S.V. Investigation the influence of magnetron power supply characteristics on chemical activity of microwave plasma / S.V. Bordusau, S.I. Madveika // Proc. of the XIXth Int. Symp., Brno, Czech Republic, September 5 – 9, 2011 / Brno University of Technology. – Brno, 2011. – P. 125 – 128.
4. Бордусов, С.В. Влияние электрических характеристик источника питания СВЧ-магнетрона на процесс плазменного удаления фоторезиста с поверхности кремниевых пластин / С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2011): материалы 21-й междунар. Крымской конф., 12 – 16 сентября 2011 г. – Севастополь: Вебер, 2011. – С. 986 – 987.
5. Данилин, Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов / Б.С. Данилин, В.Ю. Киреев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
6. Райзер, Ю.П. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Применение / Ю.П. Райзер, М.Н. Шнейдер, Н.А. Яценко. – М.: Наука, 1995. – 320 с.
7. Плазменные процессы в производстве электронной техники: в 3 т. / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А.П. Достанко. – Минск: ФУАинформ, 2001. – Т. 3. – 244 с.
8. Спектральный индикатор контроля процесса удаления фоторезиста в кислородной плазме / В.М. Долгополов [и др.] // Электронная техника. Сер. 7. Технол., организ. произв. и оборуд. – 1982. – Вып. 5(114). – С. 27 – 30.
9. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии: моногр. / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. А.П. Достанко и Н.К. Толочко. – Минск: Бестпринт, 2005. – 682 с.

Поступила 18.01.2012

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELECTRICAL MODES OF PLASMA FORMATION ON THE TOPICAL CHEMICAL ACTIVITY OF MICROWAVE PLASMA

S. BODRUSOV, S. MADVEDKO

The results of investigation of the microwave plasmachemical etching rate of photoresist films from the surface of silicon plates in the depending on of the form and frequency of the electrical pulses of the output signals (anode voltage and anode current of the microwave magnetron) of the power source, which constructed on the basis of operating in the saturation regime the high voltage transformer, are presented. The influence of different amounts of located in the volume of the discharge chamber semiconductor plates on the rate of plasmachemical etching of photoresist films from the surface of silicon plates are investigated. The possibility of stable and sustainable operation of the microwave magnetron (types M-105 or M-112) with the plasma load when using simplified power sources circuit with rectified unfiltered high voltage when the frequency of electrical pulses are 50 and 100 Hz is established. It was found the more effective (up to 1.3 times) microwave plasmachemical processing of semiconductor plates when the frequency of the electrical voltage pulses of the microwave magnetron power supply was 100 Hz in compare to 50 Hz for the same values of consumed electric power. It was established that the rate of the plasmachemical etching of photoresist films from the surface of semiconductor plates depends on the delay of the beginning of plasma formation in relation to the beginning of the magnetron generation of the microwave power.

УДК 621.39

**ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МАССИВА ФИЛЬТРОВ-ДЕЦИМАТОРОВ
С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ В ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ**

Д.И. БЕЛУСОВ, Ю.А. ЩАДЕНКОВ
(ООО «РадиоЛэб», Новополоцк)

Рассматривается архитектура конечной импульсной характеристики (КИХ) фильтра-дециматора буферного типа. Прорабатываются вопросы построения и реализации фильтра, которые позволяют значительно снизить требования к ресурсам ПЛИС при реализации массива фильтров для представления сигнала в цифровых полосах различного номинала. В качестве ключевого и наиболее «дефицитного» ресурса ПЛИС выбран умножитель. В статье приводится описание классической реализации КИХ-фильтра, рассчитывается количество умножителей, необходимых для ее реализации. В качестве альтернативы классического КИХ-фильтра-дециматора предлагается реализация КИХ-фильтра-дециматора буферного типа, а также прорабатываются вопросы оптимизации и симуляции предлагаемого фильтра. В основу оптимизации положены принципы сокращения количества умножений данных на коэффициенты фильтра: первый принцип – использование фильтра с симметричными относительно центрального коэффициентами; второй принцип – использование полуполосного фильтра с четными коэффициентами, равными нулю.

Введение. Задачи цифровой фильтрации и уменьшения полосы сигнала (децимация) – наиболее актуальны при цифровой обработке. При реализации цифровых фильтров-ресеплеров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) их возможности могут существенно ограничиваться некоторыми ресурсами ПЛИС. Наиболее «дефицитным» обычно оказывается такой ресурс, как умножители (англ. multiplier's). Из-за нехватки умножителей разработчикам приходится применять более дорогостоящие ПЛИС, снижать порядок фильтра, уменьшать количество доступных номиналов цифровых полос, что в итоге негативно сказывается на технических характеристиках конечного продукта.

В данной работе предлагается архитектура буферного КИХ-фильтра, который позволит значительно сократить требования фильтра к необходимому количеству умножителей.

Классический КИХ-фильтр. Рассмотрим классический массив из нерекурсивных КИХ-фильтров-дециматоров, которые позволяют представить входной сигнал в более узких полосах.

Характеристика фильтра может быть представлена в виде

$$y(n) = \sum_{i=0}^n b_i x(n-i), \quad (1)$$

где n – порядок фильтра; b_i – коэффициент фильтра.

Структурная схема нерекурсивного КИХ-фильтра показана на рисунке 1.

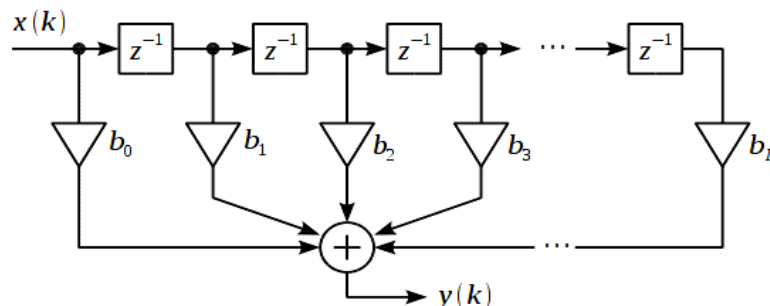


Рис. 1. Структурная схема нерекурсивного КИХ-фильтра

КИХ-фильтр порядка n содержит n линий задержки и $n + 1$ коэффициент. Если коэффициент $b_0 = 1$, получим КИХ-фильтр порядка n , у которого умножение на $b_0 = 1$ будет тривиальным. Импульсная характеристика КИХ-фильтра всегда конечна и полностью совпадает с коэффициентами фильтра. Массив таких фильтров позволяет реализовать m различных номиналов цифровых полос, где m – любое целое число.

Оценим потребность в ресурсах типа умножители для такого массива фильтров:

$$M = (n + 1) \cdot m. \quad (2)$$

Буферный КИХ-фильтр. В качестве альтернативного решения рассмотрим архитектуру буферного КИХ-фильтра-дециматора, приведенную на рисунке 2.

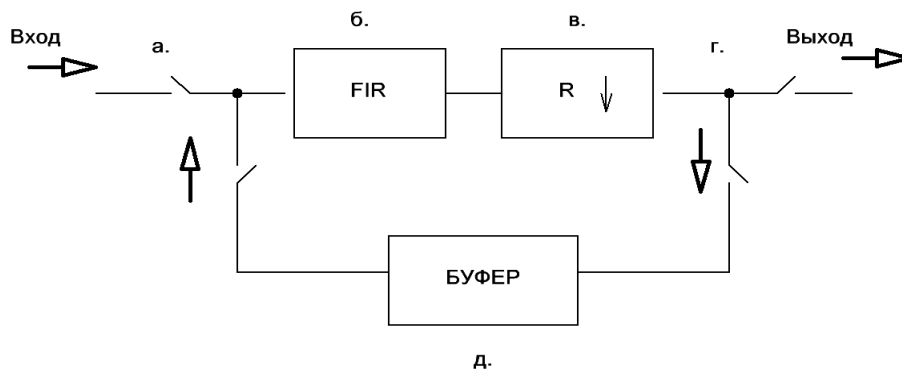


Рис. 2. Структурная схема буферного КИХ-фильтра:

а – входной логический переключатель; б – полуполосный (halfband) КИХ-фильтр;
в – блок децимации с коэффициентом $R = 2$; г – выходной логический переключатель; д – буфер

Входными данными для такого фильтра могут быть отсчеты цифрового сигнала, предварительно преобразованного на величину, равную 0 Гц.

Рассмотрим схему обработки данных таким фильтром:

1) данные поступают во входной логический переключатель *а* (рис. 2) и перенаправляются на вход КИХ-фильтра *б*, который предназначен прежде всего для устранения алиасинга во входном сигнале при децимации;

2) после фильтрации тактовая частота сигнала уменьшается вдвое с помощью дециматора *в*;

3) после децимации данные поступают в выходной коммутатор *г*. В случае если необходимая полоса сигнала не достигнута, данные перенаправляются в буфер *д*;

4) после заполнения буфер возвращает блок данных через входной коммутатор *а* для следующей итерации по сужению полосы;

5) итерации 2...4 повторяются до достижения необходимой полосы сигнала. Очевидно, что для блочных данных за счет циклической структуры обработки сигнала можно реализовать на одном фильтре любые коэффициенты децимации, кратные 2^k , где $k = 1, 2, 3, \dots$.

Данный фильтр позволяет обрабатывать поточные (непрерывные) данные с децимацией в два раза и блочные данные (блоки данных с фиксированным количеством отсчетов) с любым коэффициентом децимации, кратным 2^k , т.е. создать неограниченное количество цифровых полос.

Для поточных данных указанный фильтр может применяться с коэффициентом децимации 2. В этом случае фильтр пропускает через себя данные однократно без использования буфера. Применение фильтра с коэффициентами децимации более 2 возможно, но не так эффективно, из-за существенного снижения подавления в полосе заграждения.

Оптимизация. Рассмотрим дополнительные возможности по оптимизации требований КИХ-фильтра к количеству умножителей, необходимых для его реализации в ПЛИС.

Введем следующие ограничения в структуру фильтра: пусть каждый второй коэффициент фильтра равен нулю и коэффициенты фильтра симметричны относительно центрального коэффициента. Такой фильтр требует для реализации всего один умножитель на каждые четыре порядка, в отличие от классического фильтра КИХ.

Симметричность коэффициентов. Наглядно показать симметричность коэффициентов удобно с помощью импульсных характеристик КИХ-фильтра. Обозначим 4 типа импульсных характеристик КИХ-фильтра порядка n с количеством коэффициентов N , как показано на рисунке 3.

Фильтр 1-го типа (рис. 3, а). Фильтр четного порядка n с нечетным количеством коэффициентов N . Импульсная характеристика симметрична относительно отсчета $h((N - 1)/2)$, т.е. $h(m) = h(N - 1 - m)$, $m = 0 \dots (N - 1)/2$, при этом ось симметрии попадает на данный отсчет.

Фильтр 2-го типа (рис. 3, б). Фильтр нечетного порядка n с четным количеством коэффициентов N . Импульсная характеристика симметрична относительно оси симметрии $(N - 1)/2$, т.е. $h(m) = h(N - 1 - m)$, $m = 0 \dots (N - 1)/2$.

Фильтр 3-го типа (рис. 3, в). Фильтр четного порядка n с нечетным количеством коэффициентов N . Импульсная характеристика антисимметрична относительно отсчета $h((N - 1)/2)$, т.е. $h(m) = -h(N - 1 - m)$, $m = 0 \dots (N - 1)/2 - 1$, при этом ось симметрии попадает на центральный отсчет, который должен быть равен нулю: $h((N - 1)/2) = 0$.

Фильтр 4-го типа (рис. 3, з). Фильтр нечетного порядка n с четным количеством коэффициентов N . Импульсная характеристика антисимметрична относительно оси симметрии $(N-1)/2$, т.е. $h(m) = h(N-1-m)$, $m = 0 \dots (N-1)/2 - 1$.

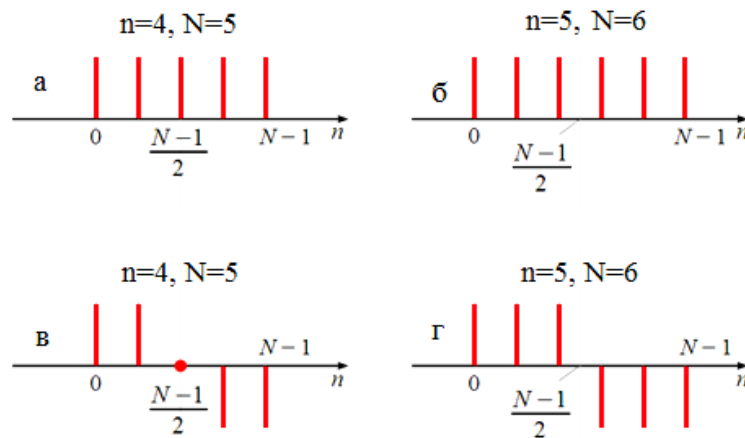


Рис. 3. Типы импульсных характеристик КИХ-фильтров

Следовательно, если коэффициенты КИХ-фильтра удовлетворяют импульсным характеристикам фильтра первого и второго типа, то достаточно одного умножителя на пару симметричных коэффициентов.

Полуполосный фильтр. При проектировании фильтра необходимым и достаточным условием равенства нулю каждого второго коэффициента является полуполосность фильтра, т.е. симметричность значений частоты среза (w_{pass}) и частоты заграждения (w_{stop}), относительно половины частоты дискретизации ($Fs/2$). Верно и обратное: у полуполосного фильтра с симметричными относительно частоты $Fs/2$ частотами среза каждый второй коэффициент равен нулю. При этом стоит заметить, что частоты среза и заграждения должны быть как можно ближе к половине частоты дискретизации. В противном случае равенство нулю каждого второго отсчета может значительно исказить характеристики фильтра.

Следовательно, при использовании полуполосного КИХ-фильтра согласно выражению (1) на нулевые коэффициенты умножители задействоваться не будут.

Если выполняется только одно свойство из указанных выше, например, если фильтр не полуполосный, но симметричный, то фильтру требуется один умножитель на два порядка.

Моделирование в MatLab. Для примера смоделируем в среде MatLab полуполосный КИХ-фильтр 62-го порядка с симметричными относительно центрального коэффициентами (рис. 4, 5).

Этот фильтр может быть задан следующим кодом в командной строке или m-файле:

$$\begin{aligned} \text{hs} &= \text{fdesign.halfband}('N,TW',62,0.1); \\ &\text{equiripple}(\text{hs}), \end{aligned} \quad (3)$$

где N – порядок фильтра, $N = 62$; TW – ширина переходной области между w_{pass} и w_{stop} , $TW = 0,1$.

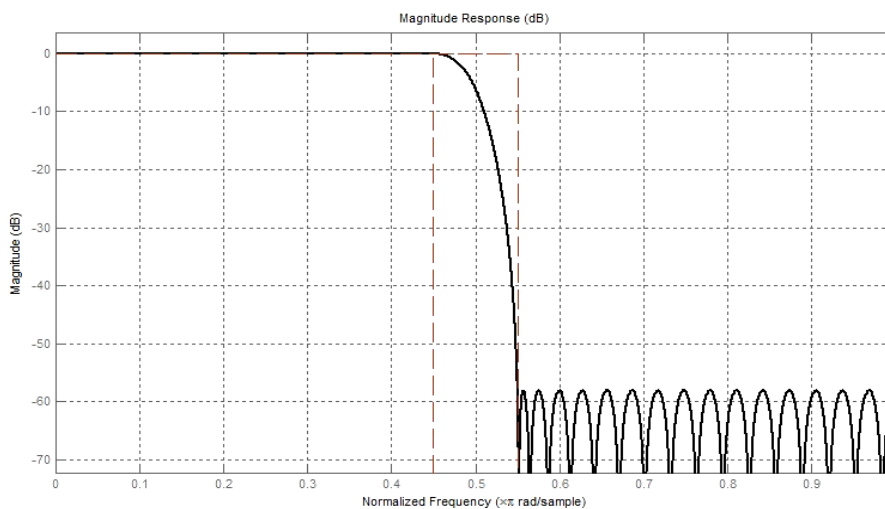
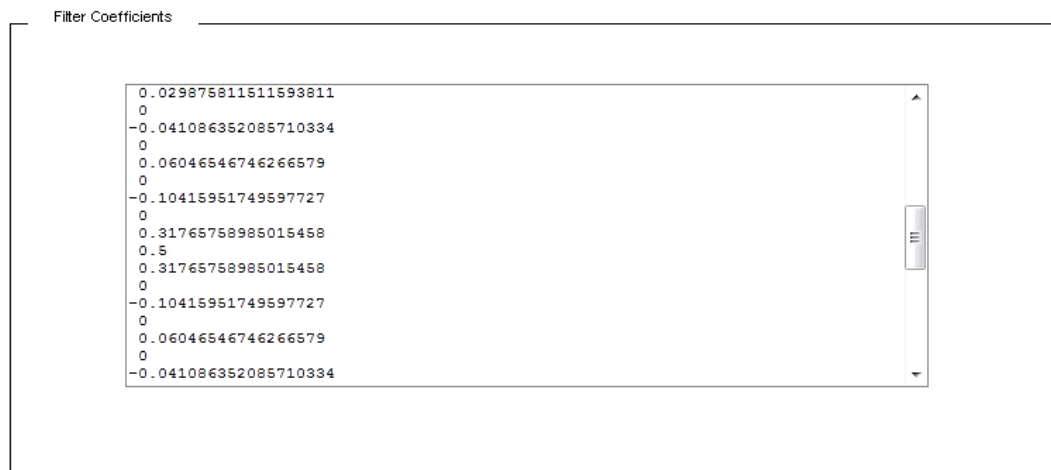


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика КИХ-фильтра ($n = 62$; $w_{pass} = 0,45$; $w_{stop} = 0,55$)

Рис. 5. Коэффициенты КИХ-фильтра ($n = 62$; $w_{\text{pass}} 0,45$; $w_{\text{stop}} = 0,55$)

Оценим общую потребность в ресурсах типа умножители для такой архитектуры фильтра:

$$M' = \frac{n+1}{4}. \quad (4)$$

Сравним значение M' из (4) с аналогичным значением M для массива классических КИХ-фильтров из выражения (2). Очевидно преимущество предлагаемой архитектуры в $4 \cdot m$ раз.

Особенности построения буферного КИХ-фильтра. При реализации буфера фильтра необходимо учитывать следующую важную особенность, что КИХ-фильтр – это нерекурсивный фильтр, или фильтр свертки. КИХ-фильтры выполняют свертку своих коэффициентов с последовательностью входных отсчетов данных, при этом результирующий объем данных возрастает по формуле:

$$K = K_d + K_\phi - 1, \quad (5)$$

где K – количество элементов в выходной последовательности; K_d – количество входных отсчетов данных; K_ϕ – количество коэффициентов фильтра.

При этом первые $K_\phi - 1$ отсчетов выходной последовательности не являются валидными.

Факт увеличения количества отсчетов на выходе можно объяснить так: КИХ-фильтр устроен как линия задержки, выходы которой умножаются на коэффициенты и суммируются. Длина линии задержки равна порядку фильтра. Следовательно, пока не заполнится вся линия задержки, на выходе данные не являются валидными.

Для того чтобы все выходные данные были валидными и неизменными по размеру, необходимо первые $K_\phi - 1$ отсчетов отбросить, в том числе и при возврате данных на следующую итерацию.

Дополнительные преимущества. Одним из важных свойств фильтра является линейность его фазочастотной характеристики (ФЧХ). Нелинейная ФЧХ фильтра искажает сигнал, т.е. разные частоты приобретают разные фазовые сдвиги и соответственно разные временные задержки на выходе фильтра. Это следует учитывать, поскольку например, при когерентной обработке, искажения фазы недопустимы. Следовательно, чем более линейна ФЧХ, тем лучше фильтр.

Дополнительным преимуществом использования полуполосного КИХ-фильтра с симметричными относительно центрального коэффициентами является линейность его ФЧХ. Это можно объяснить тем, что импульсная характеристика имеет одинаковые значения справа и слева от оси симметрии, как это показано на рисунке 3, и результат (1) будет иметь сумму слагаемых с противоположными знаками, которые взаимно компенсируют друг друга. Следовательно, получается фильтр с линейной ФЧХ. Отметим, что при четном порядке (рис. 3, а) центральный отсчет импульсной характеристики попадает на центральный коэффициент, что также указывает на фильтр с линейной ФЧХ. Таким образом, фильтр с симметричной относительно оси симметрии импульсной характеристикой всегда приводит к линейной ФЧХ.

Заключение. Предложена архитектура построения буферного КИХ-фильтра-дециматора, который позволяет уменьшить полосу входного сигнала в m раз (m – любое число, кратное 2^k) и заменяет массив из m классических фильтров-дециматоров.

Также предложена оптимизация фильтра, которая позволяет уменьшить требования фильтра к умножителям ПЛИС в 4 раза. Очевидно, что такая значительная экономия ресурса умножителей позволит реализовывать фильтры более высокого порядка.

У предложенной архитектуры существуют некоторые ограничения на применение, а именно:

- фильтр может эффективно применяться с коэффициентом децимации более 2 только с блочными данными;
- коэффициенты децимации могут быть только числами, кратными 2^k ;
- фильтр имеет относительно «жесткую» структуру, т.е. равенство нулю каждого второго коэффициента и симметричность коэффициентов относительно центрального коэффициента.

Однако, как было показано, такая структура легко реализуется стандартными средствами математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Steven W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, Second Edition, 1999, California Technical Publishing, P.O. Box 502407, San Diego, CA 92150.
2. Теория и практика цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс]: Общая методика расчета аналоговых и цифровых БИХ-фильтров. Основные понятия и определения. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/filters/ch1/ch1.html> свободный. – Загл. с экрана.
3. Теория и практика цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс]: Структуры цифровых фильтров и их характеристики. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/filters/ch10/ch10.html> свободный. – Загл. с экрана.
4. Теория и практика цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс]: Физический смысл групповой задержки фильтра. Цифровые фильтры с линейной фазочастотной характеристикой. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/filters/linphase/linphase.html> свободный. – Загл. с экрана.
5. Теория и практика цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс]: Расчет КИХ-фильтра с линейной фазочастотной характеристикой методом частотной выборки. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/filters/fir/fir.html> свободный. – Загл. с экрана.

Поступила 30.01.2012

DECIMATION FILTERS WITH FINITE IMPULSE RESPONSE ARRAYS STRUCTURE OPTIMIZATIONS FOR IMPLEMENTATION IN FPGA

D. BELORUSOV, Yu. SHCHADENKOV

The paper considers the architecture of FIR filter-resampler with buffer, which can significantly reduce the resource requirements of the FPGA. That is useful while developing the arrays of FIR-filters for signal representation in the numbers of digital bandwidths. Multiplier is selected as a key and more "scarce" resource of FPGA. The article describes the classical implementation of the FIR filter and calculated the number of multipliers required to implement it. As an alternative to the classical FIR filter decimator is proposed the implementation of the FIR filter decimator with buffer, as well as considering the issue of optimization and simulation of the proposed filter. The basis of the principles of optimization to reduce the number of multiplications of data on the filter coefficients: the first principle – the use of filter coefficients symmetrical about its center, the second principle – the use of half-band filter in which the even coefficients are zero.

УДК 532.613

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ В ОБРАЗЦАХ ПИЛОМАТЕРИАЛА ПРИ НАГРЕВЕ ЭНЕРГИЕЙ СВЧ-ПОЛЯ ЧАСТОТОЙ 2,45 ГГц

канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ,
Т.А. БУЛЬБЕНКОВА

(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрена электродинамическая задача прямого и углового падения СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц от волноводно-щелевой антенны на полубесконечную пластину с диэлектрическими характеристиками, соответствующими древесине при перпендикулярной ориентации вектора напряженности падающего поля относительно волокон. Рассмотрена задача облучения энергией СВЧ-поля пластины конечной толщины в режиме стоячей волны, образованной отражением от металлической поверхности, размещенной за пластиной. Проведено численное решение поставленных задач методом конечных элементов в двумерной области. Представлены и проанализированы результаты моделирования – зависимость глубины проникновения выделяемой тепловой мощности в пластину и коэффициента отражения СВЧ-поля от ее влагосодержания, температуры и угла наклона облучающей антенны. Показано распределение тепловой мощности в сечении пластин различной толщины, соответствующей толщине пиломатериалов стандартных сортиментов.

Введение. Нагрев и сушка влажных материалов электромагнитным полем сверхвысокой частоты (СВЧ) имеет свои преимущества для быстрого разогрева и сушки различных пиломатериалов – досок, брусков, бруса, бревен. Особенностью СВЧ-нагрева является получение таких градиентов температуры, давления пара и влагосодержания в объекте сушки, которые приводят к интенсификации прогрева и сушки, в частности к механическому выбросу части влаги в жидкой фазе, чего не достигается при обычной конвекционной сушке, кроме того при СВЧ-сушке происходит антисептическая обработка.

В настоящее время активно ведется разработка сушилок пиломатериалов с нагревом энергией СВЧ-поля. Применяемые в таких сушилках мощные магнетроны, которые генерируют СВЧ-волны частотой 416 или 915 МГц с полезной мощностью 25...100 кВт, весьма дорогостоящие. Например, стоимость магнетрона мощностью 25 кВт с источником питания составляет около 25 тыс. долл. США. Доступные маломощные магнетроны на частоту 2,45 ГГц (2,465 ГГц) гораздо дешевле. Разработка СВЧ-сушилок на таких магнетронах для сушки пиломатериалов различных сортиментов – перспективное направление. Для обеспечения равномерного прогрева материалов энергией СВЧ-поля критическим является глубина проникновения электромагнитного поля в материал.

Цель данной работы – оценка глубины проникновения тепловой энергии СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц, возбуждаемого антенной, в пиломатериал в зависимости от его влажности и температуры, оценка величины отражений падающего СВЧ-поля, а также исследование распределения тепловой мощности в сечении пиломатериалов различных сортиментов при облучении их в режиме стоячей волны.

Экспериментальное измерение распределения напряженности и тепловой мощности СВЧ-поля в материалах при помощи зондов, термопар, полупроводниковых датчиков температуры и т.п. затруднено ввиду значительных искажений поля вблизи датчиков (вследствие отражения от них) и появления паразитных токов, вызванных электрическими наводками. В этих случаях физико-математическое моделирование с применением численных методов математической физики является основным инструментом для изучения сложных электродинамических, тепловых процессов и массообмена.

Постановка задачи прямого и углового падения СВЧ-поля на полубесконечную пластину. Рассмотрим электродинамическую задачу падения СВЧ-поля частотой $f = 2,45$ ГГц, возбуждаемого волноводно-щелевой антенной, на плоскую полубесконечную пластину (рис. 1).

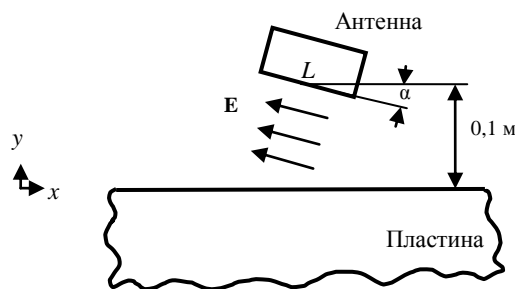


Рис. 1. Постановка электродинамической задачи

Распространение гармонической СВЧ-волны напряженностью электрического поля \mathbf{E} формулировалось в виде волнового уравнения Гельмгольца [1 – 3]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E} \right) - \varepsilon \cdot k_0^2 \cdot \mathbf{E} = 0,$$

где ε , μ – комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; k – волновое число.

Для частоты $f = 2,45$ ГГц волновое число k_0 :

$$k_0 = 2\pi \cdot f / c = 51,5 \text{ рад/м},$$

где c – скорость света в вакууме, $3 \cdot 10^8$ м/с.

На внешних границах области моделирования задавалось согласованное граничное условие с волновым числом k_0 ; на границе источника – согласованное граничное условие, в котором задавались напряженность магнитного поля источника $H_0 = 1$ А/м и число k_0 ; на границе раздела сред – условие непрерывности. Длина и ширина пластины выбирались достаточно большими, с целью минимизации краевых эффектов и полного затухания СВЧ-волны в пластине.

Решение в двумерной области дифференциальных уравнений СВЧ-электродинамики с граничными и начальными условиями проводилось в специальном программном пакете методом конечных элементов.

Ориентация вектора напряженности \mathbf{E} электрического поля антенны принималась перпендикулярной волокнам древесины, что обеспечивает в 1,2...1,5 раза большую глубину проникновения СВЧ-поля в древесину по сравнению с ориентацией вектора напряженности параллельно волокнам за счет более низкого значения диэлектрических потерь. Диэлектрическая проницаемость образца при перпендикулярной ориентации вектора напряженности падающего поля $\varepsilon = \varepsilon_{\perp} = \varepsilon'_{\perp} - j\varepsilon''_{\perp}$ принималась согласно [4] в зависимости от влагосодержания древесины u и температуры T . Предполагалось, что распределение влаги и температуры по сечению пластины равномерное. Расчеты производились для влагосодержаний 0,8, 0,6 и 0,3 кг/кг при температуре 20 и 80 °С.

В результате моделирования определялись глубина проникновения в образец половинной мощности $h^{0,5}$ (м), интегральная тепловая мощность поглощенная пластиной Q (Вт) и рассчитывался коэффициент отражения $S_{\text{отр}}$:

$$Q = \int_V 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' \cdot |\mathbf{E}|^2; \quad S_{\text{отр}} = \sqrt{P_{\text{отр}}/P_0}; \quad P_{\text{отр}} = P_0 - P_{\text{погл}},$$

где P_0 – мощность СВЧ-волны, излучаемой антенной, которая определялась исходя из заданной протяженности излучателя СВЧ-поля L , в качестве которого принималась ширина щелевой антенны 0,09 м для частоты 2,45 ГГц и некоторой заданной напряженности магнитного поля излучателя $H_0 = 1$ А/м по выражению:

$$P_0 = L \cdot 0,5 \cdot E_0^2 / 377 = L \cdot 0,5 \cdot 377 \cdot H_0^2.$$

Прямое падение СВЧ-волны на пластину. Вначале рассматривалось прямое падение СВЧ-волны от антенны при $\alpha = 0$ на полубесконечную пластину. Согласно результатам моделирования напряженность электрического поля в пластине убывает с увеличением расстояния y от поверхности вглубь пластины по экспоненциальному закону $e^{-\beta \cdot y}$, где β – коэффициент распространения, что соответствует теории электродинамики, а выделяемая тепловая мощность – по закону $e^{-2\beta \cdot y}$. Глубина проникновения $h^{0,5}$ половинной тепловой мощности и коэффициент отражения $S_{\text{отр}}$ представлены на рисунке 2.

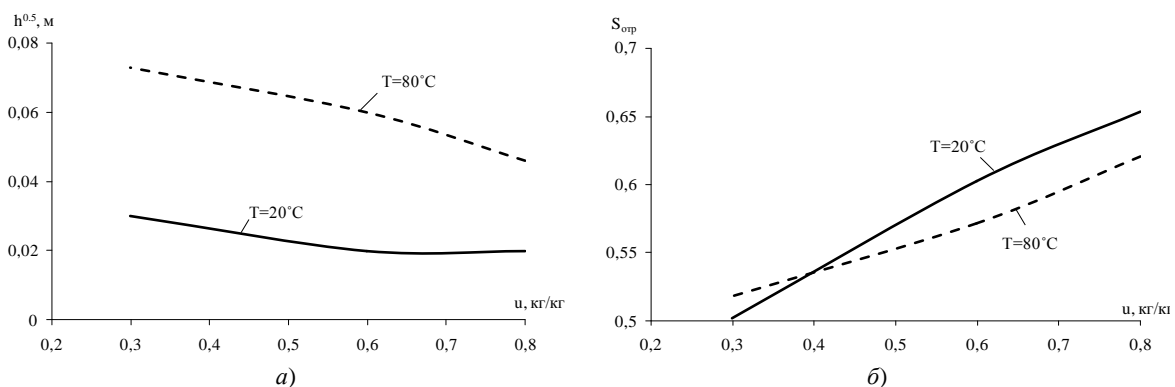


Рис. 2. Глубина проникновения $h^{0,5}$ половинной мощности в образец (а) и зависимость коэффициента отражения СВЧ-поля $S_{\text{отр}}$ от образца (б) в зависимости от его влагосодержания и температуры

Угловое падение СВЧ-волны на пластину. Рассматривалось угловое падение СВЧ-волны от антенны для углов α , равных 15, 30 и 45 градусов, на полубесконечную пластину. Результаты моделирования приведены на рисунке 3 а, б.

На рисунке 3, а показано распределение модуля вектора напряженности СВЧ-поля между антенной и пластиной и распределение мощности источников тепла Q в пластине, где видно образование стоячей волны между поверхностью пластины и антенной, а также затухание энергии СВЧ-поля в материале. С увеличением угла наклона антенны коэффициент отражения $S_{отр}$ уменьшается, что видно из рисунка 3, б.

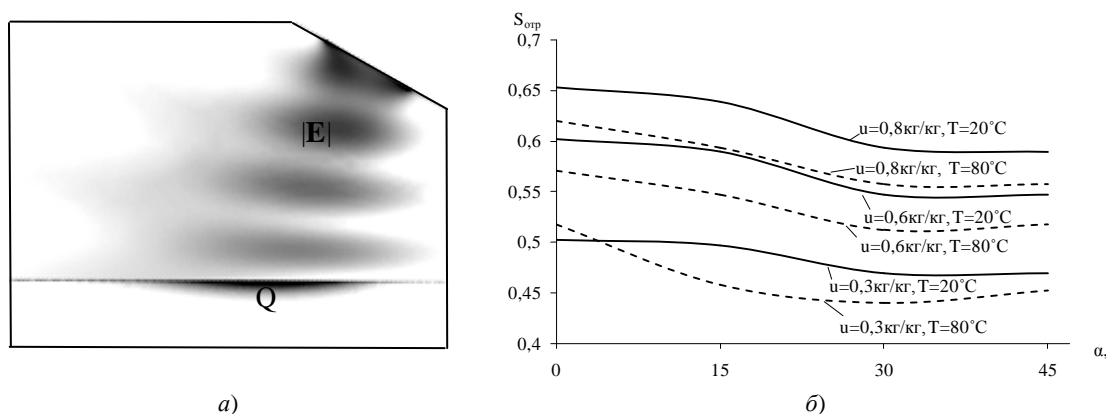


Рис. 3. Фрагмент картины распределения модуля напряженности СВЧ-поля E и мощности Q в образце с влажностью $u = 0,6 \text{ кг/кг}$, $T = 80^\circ\text{C}$, $\alpha = 30^\circ$ (а) и изменение коэффициента отражения $S_{отр}$ при изменении наклона антенны при разном влажностном содержании u и температуре T (б)

Постановка задачи прямого облучения СВЧ-полем пластины конечной толщины в режиме стоячей волны. При прямом СВЧ-облучении пластины распределение напряженности поля и, соответственно, выделяемой тепловой мощности по толщине доски будет формироваться как прошедшей волной, так и вторичными волнами, возникающими в результате многократных переотражений их от внутренних границ материала с образованием стоячих волн. Расположение объектов сушки над отражающей металлической поверхностью (поддоном) позволяет использовать волну, прошедшую объект, для его дополнительного нагрева.

Рассматривалась задача прямого падения СВЧ-волны (рис. 4) на пластину толщиной d , с отражающей поверхностью, размещенной на расстоянии $d' = \lambda/4 = 0,03 \text{ м}$ и $d' = \lambda/2 = 0,06 \text{ м}$ за пластиной, где λ – длина волны для частоты СВЧ-поля 2,45 ГГц, равная 0,122 м. Граничное условие для отражающей поверхности под пластиной задавалось как идеально проводящее.

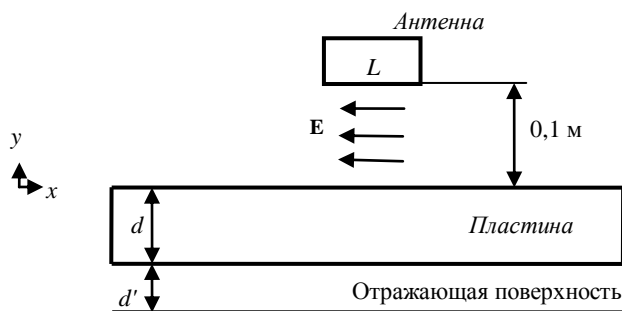


Рис. 4. Постановка электродинамической задачи нагрева пластины в режиме стоячей волны

Расчет распределения мощностей внутренних источников тепла в пластине выполнялся для стандартных сортов пиломатериалов 25, 40, 50 и 100 мм, с влажностью 0,8 и 0,6 кг/кг при температурах 20 и 80 °C и расположении отражающей поверхности на расстояниях $d' = \lambda/4 = 0,03 \text{ м}$ и $d' = \lambda/2 = 0,06 \text{ м}$ от пластины.

На рисунках 5 и 6 представлены результаты моделирования – картина распределения удельной мощности источников тепла Q в сечении пластины и значения коэффициентов отражения СВЧ-поля $S_{отр}$.

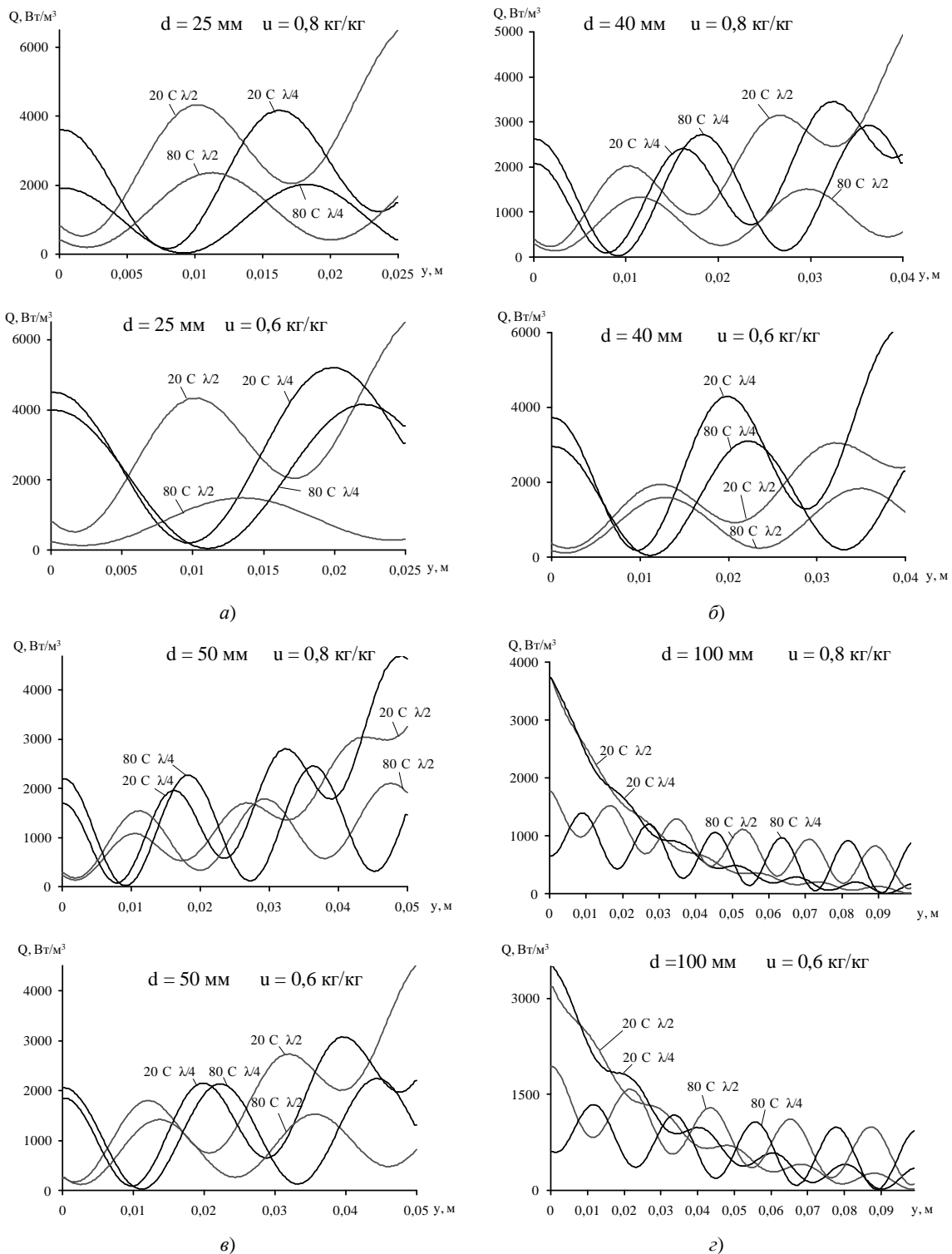


Рис. 5. Распределение мощности источников тепла Q в сечении пластины толщиной 25 мм (а), 40 мм (б), 50 мм (в), 100 мм (з) в зависимости от влагосодержания, температуры и расстояния до отражающей поверхности

Представленное на рисунке 5 распределение удельной тепловой мощности в сечении пластин различной толщины обусловлено наличием стоячих СВЧ-волн с максимумами и минимумами напряженности, образованных многократно отраженными волнами от внутренних границ самой пластины и отра-

жающей поверхности. В зависимости от расстояния d' , равного $\lambda/4$ или $\lambda/2$, максимумы выделяемой тепловой мощности также смещаются внутри пластины. Согласно рисунку 5 с начальным нагрев пластин толщиной 100 мм с влагосодержаниями 0,8 и 0,6 кг/кг будет крайне неравномерен вследствие значительного затухания волны на данной толщине пластины, поэтому тепловыделение будет локализовано в области пластины, близкой к стороне подвода СВЧ-энергии.

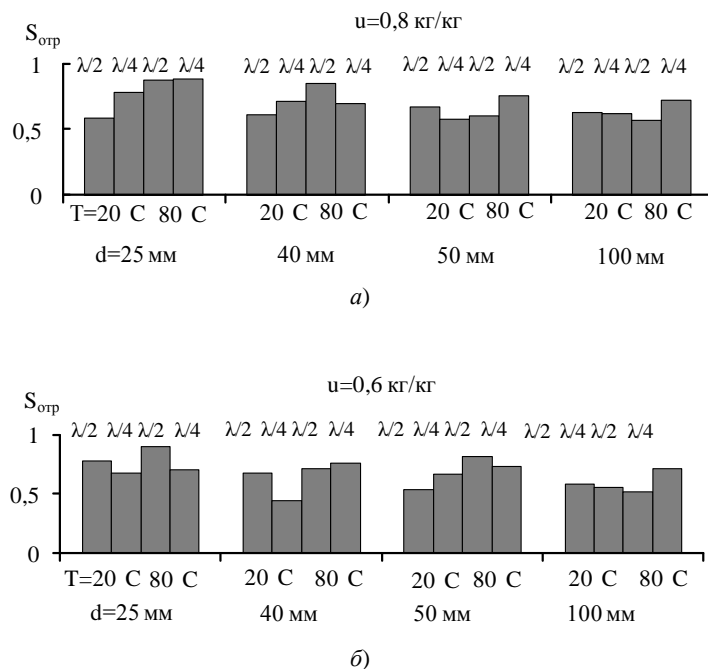


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения СВЧ-поля от пластин различной толщины от их температуры и расстояния до отражающей поверхности при влагосодержании 0,8 кг/кг (а) и 0,6 кг/кг (б)

Согласно рисунку 6 при облучении пластин до 50 мм с наличием отражающей поверхности коэффициент отражения в целом выше, чем при облучении пластины толщиной 100 мм, за счет волны, отраженной от поверхности. Более высокий коэффициент отражения наблюдается также при облучении пластин меньшего влагосодержания, кроме того коэффициент отражения зависит от расстояний d' , равных $\lambda/4$ или $\lambda/2$. Указанное увеличение коэффициента отражения обусловлено тем, что отраженная от поверхности волна не успевает затухнуть полностью на данной толщине образца.

Анализ результатов и заключение. Глубина проникновения СВЧ-поля в пиломатериал увеличивается с уменьшением его влагосодержания и увеличением температуры за счет снижения диэлектрических потерь. Например, согласно расчетам глубина проникновения половинной мощности в древесину влажностью 0,8 кг/кг при температуре 20 °С составляет примерно 0,02 м, в процессе прогрева до температуры 80 °С глубина увеличивается до 0,04 м. Прогрев влажной древесины СВЧ-полем частотой 2,45 ГГц с приемлемой степенью равномерности возможен лишь при незначительной ее толщине. Применение недорогих магнетронов с частотой 2,45 ГГц оправданно для нагрева пиломатериалов небольшой толщины и использования их в СВЧ-камерах с малым объемом загрузки.

При прямом падении СВЧ-волны на пиломатериал коэффициент отражения составляет 0,55...0,65 (25...40 % по мощности). При нагреве наблюдается снижение коэффициента отражения из-за уменьшения значений диэлектрических характеристик древесины ϵ'_1 и ϵ''_1 . Отраженная волна частично возвращается в тракт питания СВЧ-генератора, частично образует вторичные волны, отраженные от элементов технологической камеры.

При подводе СВЧ-энергии к материалу с наклоном антенны коэффициент отражения снижается на 10...20 %. Поэтому для СВЧ-нагрева можно рекомендовать углы наклона облучающих антенн 15...30 градусов относительно поверхности, что улучшит согласование тракта «источник – излучатель – материал» и уменьшит вторичные волны.

Нагрев пиломатериалов толщиной не более 50 мм возможен при одностороннем подводе энергии СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц. Для нагрева сортаментов сечением 100 мм и более (например, бруса 100 × 100 мм) целесообразен двухсторонний подвод СВЧ-энергии.

Более медленный прогрев древесины СВЧ-полем на стадии пропаривания до температуры сушки обеспечит большую равномерность распределения температуры и влагосодержания в сечении пиломатериала за счет инерционности тепловых процессов, а также фильтрационного переноса тепла с паром и жидкостью в более холодные участки капиллярно-пористого материала.

Распределение температурного поля в материалах на начальной стадии СВЧ-нагрева можно получить, решив уравнение теплопроводности. Для качественного и количественного изучения процессов тепломассообмена в материале, выбора приемлемых режимов сушки пиломатериалов при нагреве энергией СВЧ-поля необходимо решение электродинамической задачи совместно с системой уравнений тепломассообмена в капиллярно-пористых материалах с соответствующими краевыми и замыкающими соотношениями [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерофеенко, В.Т. Математические модели в электродинамике: курс лекций: в 2 ч. / В.Т. Ерофеенко, И.С. Козловская. – Минск: БГУ, 2008. – Ч. 2. – 167 с.
2. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М.: Наука, 1989.
3. Кураев, А.А. Электродинамика и распространение радиоволн / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Синицын. – Минск: Бестпринт, 2004. – 357 с.
4. Адамович, А.Л. Определение комплексной диэлектрической проницаемости древесины в СВЧ-диапазоне / А.Л. Адамович // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2005. – № 10. – С. 37 – 43.
5. Моделирование процессов термовлагопереноса в капиллярно-пористых средах / С.П. Кундас [и др.]. – Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2007.

Поступила 30.01.2012

DISTRIBUTION OF HEAT ENERGY IN THE LUMBER SAMPLES DURING HEATING OF MICROWAVE POWER WITH FREQUENCY OF 2,45 GHZ

A. ADAMOVICH, Y. GROZBERG, T. BULBENKOVA

The electrodynamic problem of the direct and the angles of incidence of the microwave field of 2.45 GHz waveguide-slot antenna on a semi-infinite plate with a dielectric characteristics of the corresponding timber in the perpendicular orientation vector of the incident field with respect to the fibers are considered. The problem of radiation energy of the microwave field plate of finite thickness in the standing waves formed by reflection from a metal surface, placed over the plate are considered. The numerical solution of the tasks the finite element method in two-dimensional region. Presented and analyzed the results of modeling – the dependence of the penetration depth of thermal power released in the plate and the reflection coefficient of the microwave field from the plate, depending on its moisture content, temperature and angle of the incident antenna, as well as the distribution of thermal power in the cross section of plates of different thicknesses corresponding to the thickness of standard lumber assortments.

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ «ИннТехМаш-11»

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

(Новополоцк, 19 – 20 октября 2011 года)

В Полоцком государственном университете состоялась международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии в машиностроении», посвященная 35-летию машиностроительного факультета Полоцкого государственного университета.

Целью конференции являлся обмен научно-технической информацией по перспективным направлениям развития машиностроения, подготовки специалистов для машиностроения и инновационному сопровождению наукоемких разработок, а также установление деловых контактов между научными, образовательными и промышленными организациями и предприятиями Республики Беларусь и зарубежных стран.

Выбор места проведения международной конференции – Полоцкий государственный университет – не случаен. Машиностроительный факультет – один из старейших в университете, со сложившимися традициями и достижениями, известными в республике. Профессорско-преподавательский состав факультета уникален, так как формировался из представителей различных научных и учебных школ России и Беларуси и развивался в тесной взаимосвязи с учеными, прежде всего, Физико-технического института НАН Беларуси и Белорусского национального технического университета. Сегодня это один из научных коллективов в республике, которому по плечу решение сложнейших производственных задач в области механической обработки материалов, конструирования станков и инструментов, проектирования новых технологических процессов и подготовки кадров по современным научно-техническим направлениям в области машиностроения.

В качестве организаторов конференции выступили: Министерство образования Республики Беларусь и Национальная академия наук Беларуси, Государственный комитет по науке и технологиям и Министерство промышленности Республики Беларусь, Витебский областной исполнительный комитет, Новополоцкий и Полоцкий городские исполнительные комитеты.

В состав организационного комитета конференции вошли: **Анатолий Илларионович Гордиенко** – директор ФТИ НАН Беларуси, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор; **Александр Петрович Кастрюк** – первый проректор ПГУ, кандидат технических наук, доцент; **Валерий Константинович Шелег** – заведующий кафедрой «Технология машиностроения» БНТУ, доктор технических наук, профессор, академик Международной Академии наук Евразии; **Александр Аркадьевич Лысов** – декан машиностроительного факультета ПГУ, кандидат технических наук, доцент; **Николай Николаевич Попок** – заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительного производства» ПГУ, доктор технических наук, профессор.

Открыли конференцию от имени ректората университета и оргкомитета **Александр Петрович Кастрюк и Анатолий Илларионович Гордиенко**. Они поприветствовали участников конференции и пожелали плодотворной работы.



Открытие конференции – приветствие академика НАН Беларуси А.И. Гордиенко



Приветствие участников конференции – в президиуме слева направо:
И.В. Войтов, Н.Н. Попок, А.И. Гордиенко, В.К. Шелег, А.А. Лысов

Первым докладом на **пленарном заседании** был доклад Председателя государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь **И.В. Войтова** об инновационной политике Республики Беларусь на период до 2020 года.



Выступление И.В. Войтова

Далее были представлены доклады:

- > директора Физико-технического института НАН Беларуси **А.И. Гордиенко** о новых импортозамещающих и ресурсосберегающих материалах для промышленности;
- > профессоров Полоцкого государственного университета **Н.Н. Попка** и **В.А. Данилова** о мобильном производстве с интенсификацией механической обработки поверхностей деталей машин;
- > профессора Брянского государственного технического университета **В.И. Аверченкова** о построении единого информационного пространства малых инновационных машиностроительных предприятий;
- > профессора Московского государственного технологического университета «Станкин» **В.А. Косарева** об основных разработках по учебным планам, соответствующим новым образовательным стандартам.

На пленарном заседании были заслушаны фрагменты докторских работ **В.В. Богатыревой** о необходимости оценки человеческого капитала машиностроительной отрасли Республики Беларусь и **В.Г. Залесского** об электронно-лучевых процессах и оборудовании.

Первый заместитель Витебского облисполкома Комитета экономики **Н.В. Салтанович** сделала доклад об основных направлениях инновационного развития Витебской области.

В рамках конференции «ИннТехМаш-11» состоялись заседания **секций** и **круглые столы**:

- > «Технология и оборудование машиностроительного производства»;
- > «Материалы и технологии при эксплуатации техники»;
- > «Методическое обеспечение подготовки кадров для машиностроения»;
- > «Инфраструктура и программы инновационной деятельности».

Секционные доклады касались как вопросов проектирования и изготовления машин, так и их последующей эксплуатации, включающей использование по назначению, техническое обслуживание и ремонт с восстановлением деталей.

Особый интерес вызвали доклады **И.Н. Степанкина** о контактной прочности инструментальных сталей в составе высадочных штампов и **В.В. Ткаченко** о системах управления промышленного оборудования, обеспечивающих безопасную работу обслуживающего персонала.

Ряд докладов были посвящены изучению состава, структуры и свойств материалов в составе покрытий при восстановлении деталей, повышению долговечности изделий машиностроения, диагностированию механизмов и др.

Проблемы инженерно-технического образования рассмотрены в докладах **Л.С. Турищева**, **В.Ф. Коренского**, **А.В. Крыленко**, **В.Н. Седюкевича**, **Д.В. Капского**. Отмечены особенности контроля успешности обучения, методического обеспечения курсового проектирования, престижа аспирантской подготовки и подготовки специалистов транспортного комплекса.

Всего в работе конференции приняли участие около 70 ученых, представителей промышленности и исполнительной власти, в том числе два академика и два члена-корреспондента НАН Беларуси, а также более 300 студентов машиностроительных специальностей университета. Было заслушано 59 докладов.

К началу конференции был издан сборник материалов конференции объемом 300 страниц. Каждый участник конференции, приславший свои статьи и прошедший рецензирование, мог получить материалы конференции и ознакомиться со всеми докладами.

В представленных материалах были отражены современное состояние и направления развития технологии и оборудования механической и физико-технической обработки, рассмотрены научные основы создания новых материалов, изготовления, упрочнения и обеспечения качества деталей машин, эксплуатации, восстановления ресурса, диагностирования машин. Рассмотрены актуальные проблемы инновационной деятельности, трансфера технологий и инженерно-технического образования.

Завершилась конференция подведением итогов и принятием резолюции. Участники конференции отметили высокий уровень и разнообразие докладов, осветивших проблемы как в научно-технической, так и в образовательной, инновационной и производственной сферах; необходимость более тесной интеграции науки, образования и промышленности в решении научно-технических задач, в разработке совместных инновационных проектов в научно-технических программах, в том числе Союзного государства, в объединении усилий вузов и академических институтов в области подготовки кадров, активизации работы союза славянских вузов.

Было высказано предложение о целесообразности проведения в рамках конференции стендовой секции молодых ученых с презентацией диссертационных работ.

Гости ознакомились с выставками научно-технических разработок сотрудников Полоцкого государственного университета, учебной и научно-технической литературы.

Н.Н. Попок, заведующий кафедрой технологии и оборудования машиностроительного производства
Полоцкого государственного университета,
доктор технических наук, профессор

В.П. Иванов, доктор технических наук,
профессор кафедры технологии конструкционных материалов
Полоцкого государственного университета

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Данилов В.А.</i> Методологические основы синтеза кинематики формообразования и кинематических схем обработки при функциональном проектировании станочного оборудования	2
<i>Иванов В.П., Мозалевский Д.В., Артюшевская Н.В.</i> Совершенствование организации дорожного движения в городе Новополоцке.....	11
<i>Капский Д.В., Кузьменко В.Н., Коржова А.В., Горелик Е.Н., Полховская А.С.</i> Совершенствование организации дорожного движения на магистральной улице общегородского значения	15
<i>Луначёв А.В., Павлюк С.К.</i> Дуговая сварка и пайка оцинкованных узлов теплотрасс и их коррозионная стойкость	21
<i>Березиенко В.П., Фурманов С.М., Бендик Т.И., Воронов Е.Л.</i> О влиянии условий охлаждения электродов на характер деформирования поверхностей деталей при точечной сварке.....	28
<i>Францкевич В.С., Вайтехович П.Е.</i> Методика расчета энергозатрат на измельчение в среднеходных мельницах.....	34
<i>Степанкин И.Н., Кенько В.М., Поздняков Е.П., Камко А.И.</i> К вопросу исследования контактной выносливости быстрорежущей стали Р6М5	39
<i>Бетенья Г.Ф., Анискович Г.И., Андрушевич А.А., Декевич П.А., Литовчик Д.П., Маринич Л.А., Петюшик Е.Е., Маркова Л.В., Фомихина И.В.</i> Объёмные нанокристаллические износостойкие детали рабочих органов сельскохозяйственной техники	46
<i>Агабейли Т.А., Садыхов С.Я., Алекперов Р.Д., Мамедов Р.В.</i> Технология обработки и разуплотнения почвы.....	52
<i>Туромша В.И.</i> Скоростное силовое фрезерование	56
<i>Печковская О.Е., Пайкевич М.Ф., Машин Ю.В.</i> Основы проектирования эксцентриковых передач с повышенным техническим уровнем.....	65
<i>Попок Н.Н.</i> Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Часть 1. Термины и системы обозначений режущих пластин, державок и модулей	71
<i>Шматов А.А.</i> Модифицирование стали в вододисперсной среде.....	82
<i>Устинович Д.Ф., Голуб В.М.</i> Управление тепловыми режимами при обработке плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками	90
<i>Шабловский Я.О.</i> Применение полиморфных кристаллических веществ для термо- и криостатирования	95
<i>Киселёв М.Г., Дроздов А.В., Ямная Д.А.</i> Исследование временных и частотных параметров контактного взаимодействия заготовки с распиловочным диском при сообщении ей двухмерного периодического циркуляционного движения.....	102

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Покровская С.В., Ощепкова Н.В., Завадский А.В., Булавка Ю.А.</i> Ультразвуковая кавитационная обработка коллоидных систем смазочных материалов.....	109
--	-----

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

<i>Грозберг Ю.Г., Адамович А.Л., Мателенок Ю.В.</i> Автоматизированная система управления для установки комбинированной сушки древесины СВЧ- и конвекционным нагревом	114
<i>Бордусов С.В., Мадвейко С.И.</i> Исследование влияния электрических режимов плазмообразования на локальную химическую активность плазмы СВЧ-разряда	119
<i>Белорусов Д.И., Щаденков Ю.А.</i> Оптимизация структуры массива фильтров-дециматоров с конечной импульсной характеристикой для реализации в программируемых логических интегральных схемах.....	124
<i>Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Бульбенкова Т.А.</i> Распределение тепловой мощности в образцах пиломатериала при нагреве энергией СВЧ-поля частотой 2,45 ГГц.....	129

ХРОНИКА НАУЧНОЙ ЖИЗНИ

<i>Попок Н.Н., Иванов В.П.</i> Инновационные технологии в машиностроении «ИннТехМаш-11»: международная научно-техническая конференция, Новополоцк, 19 – 20 октября 2011 года.....	135
---	-----