

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

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



ВЕСНИК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваўне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машынабудавання і машыназнаўства, матэрыялазнаўства і металургіі, 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.
Редактор Р.Н. Авласенок.

Подписано к печати 29.08.2014. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 18,59. Уч.-изд. л. 22,42. Тираж 100 экз. Заказ 1571.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.941.1

**ТОЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ
С НАЛОЖЕНИЕМ НА ПОДАЧУ ИНСТРУМЕНТА АСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ**

д-р техн. наук, проф. В.К. ШЕЛЕГ, С.С. ДАНИЛЬЧИК
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассматривается процесс точения конструкционных сталей с наложением на подачу инструмента асимметричных колебаний. В ходе исследования выявлено, что минимальная амплитуда колебаний инструмента, достаточная для стружкодробления, увеличивается с ростом подачи и глубины резания. Получены графические и математические зависимости шероховатости обработанной поверхности от подачи, глубины резания и коэффициента асимметрии цикла колебаний, которые позволили установить ряд новых закономерностей.

Точение с наложением на подачу инструмента дополнительных направленных колебаний с асимметричным циклом предназначено для обработки деталей с образованием дробленой стружки. Негармонические колебания, сообщаемые инструменту, характеризуются различными временными промежутками движения резца в течение цикла в направлении подачи и обратном направлении, т.е. коэффициентом асимметрии ξ цикла колебаний [1]. Каждому коэффициенту асимметрии соответствует определенная частота колебаний f , обеспечивающая устойчивое дробление стружки при минимальной амплитуде колебательных движений. Отношение частоты колебаний f к частоте вращения заготовки n можно определить по формуле

$$\frac{f}{n} = z + \frac{1}{\xi + 1},$$

где z – число полных колебаний за один оборот заготовки.

Обработка деталей с минимальной, достаточной для устойчивого дробления стружки, амплитудой колебаний позволяет уменьшить негативное влияние колебательного движения инструмента на точность и качество обработанных поверхностей [2].

Целью данной работы является определение зависимости минимальной амплитуды колебаний от режимов резания и влияния режимов резания и коэффициента асимметрии цикла колебаний на шероховатость и точность обработанных поверхностей.

Для исследования применялось гидромеханическое устройство, позволяющее устанавливать коэффициент асимметрии цикла колебаний сменными кулачками, а амплитуду регулировать дросселем. Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 45, так как она имеет широкое применение в машиностроительном производстве и является эталонной; в сравнении с ней оценивается обрабатываемость резанием других сталей. Приняты пределы режимов резания, на которых при традиционной обработке резцом из твердого сплава Т15К6 сходит сливная стружка. Так, глубина резания принята в пределах $t = 1...3$ мм, подача $S_0 = 0,075...0,3$ мм/об, скорость резания $V = 70...141$ м/мин. Обрабатывались образцы диаметром 45 и длиной 300 мм. Крепление образцов на токарном станке выполнялось в трехкулачковом патроне с поджатием центром пиноли задней бабки. Обработка велась резцом, оснащенным неперетачиваемой многогранной пластиной и имеющим следующие геометрические параметры: углы в плане $\phi = 45^\circ$ и $\phi_1 = 45^\circ$, передний угол $\gamma = 15^\circ$, задний угол $\alpha = 15^\circ$, угол наклона главной режущей кромки $\lambda = 7^\circ$; радиус при вершине $r = 0,8$ мм. Исследовался процесс точения с коэффициентами асимметрии цикла колебаний $\xi = 1/4, 1/3, 1/2, 2, 3$ и 4 на различных режимах резания. Результаты сравнивались с результатами обычного точения и вибрационного точения с гармоническими колебаниями ($\xi = 1$).

Математическая модель влияния режимов резания на минимальную амплитуду колебаний инструмента получена на основе данных полного факторного эксперимента типа 2^3 ; в качестве факторов приняты подача, глубина и скорость резания. Математическая модель минимальной амплитуды для коэффициента асимметрии цикла колебаний $\xi = 1/2$ имеет вид

$$A_{\min} = 0,00036 + 0,48775 \cdot S_0 + 0,02092 \cdot t - 0,00018 \cdot V.$$

Аналогичные регрессионные модели получены для процесса точения с другими коэффициентами асимметрии. Оценка этих моделей позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на минимальную амплитуду оказывает подача. Наименее значимым фактором является скорость резания. Взаимодействие факторов не оказывает существенного влияния на величину амплитуды. Объяснить влияние режимов резания на минимальную амплитуду можно следующим образом. Увеличение подачи влечет за собой увеличение толщины среза, что в свою очередь требует для разделения сливной стружки на элементы увеличения минимальной амплитуды колебаний. Теоретическая минимальная амплитуда составляет $0,5S_o$, но на практике эта величина может существенно изменяться из-за упругих деформаций системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ) [2]. Зависимость минимальной амплитуды от глубины резания обусловлена изменением сил резания и, соответственно, упругих деформаций. Поэтому с ростом глубины резания следует увеличивать и минимальную амплитуду. Влияние скорости резания на минимальную амплитуду при точении с асимметричными колебаниями незначительно. Увеличение скорости резания ведет к росту температуры в зоне резания, что способствует размягчению тонкого слоя стружки, в результате чего снижается трение между стружкой и резцом [3; 4] и, следовательно, уменьшаются силы резания и упругие деформации системы СПИЗ. Таким образом, упругие деформации, возникающие в ходе обработки и зависящие от режимов резания, требуют увеличения минимальной амплитуды по сравнению с теоретической амплитудой на 5...50 % в зависимости от режимов обработки.

Для оценки качества поверхностей, обработанных точением с асимметричными колебаниями инструмента, в качестве параметра шероховатости принято среднее арифметическое значение R_a . На рисунке 1 представлен график зависимости шероховатости от подачи.

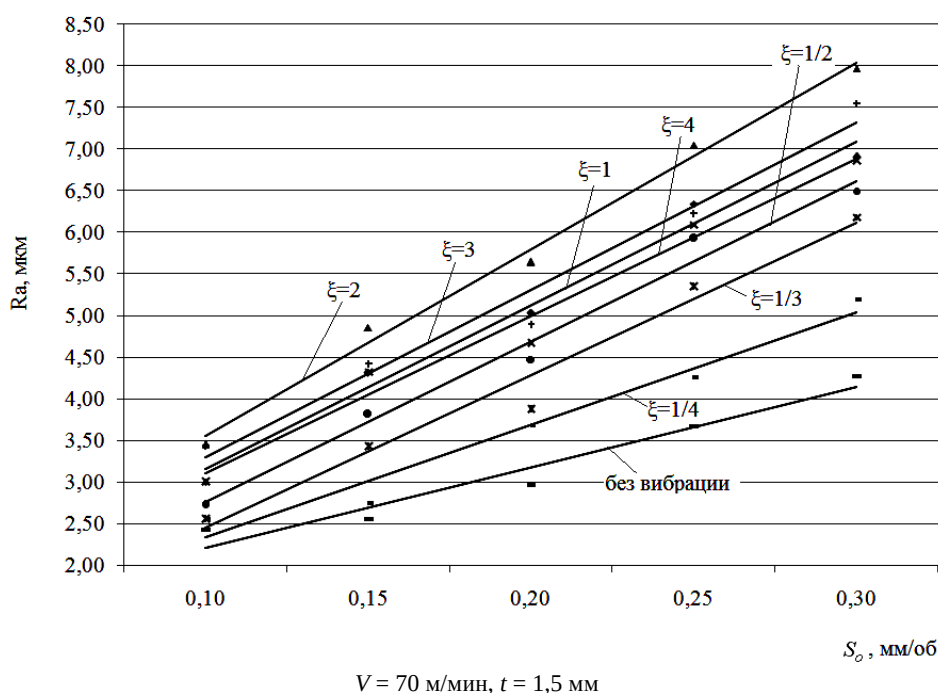


Рис. 1. Зависимость шероховатости от подачи

В отличие от обычного точения, где осевое расстояние между траекториями движения резца относительно детали на соседних витках одинаково и равно подаче на оборот S_o , при точении с симметричными колебаниями оно изменяется от нуля до максимального значения $\Delta_{\max}$ [5]:

$$\Delta_{\max} = S_o \left(1 + \frac{1}{\xi} \right) \text{ для } \xi > 1 \text{ и}$$

$$\Delta_{\max} = S_o (1 + \xi) \text{ для } \xi < 1.$$

В результате происходит увеличение высоты гребешков, остающихся после обработки. Таким образом, шероховатость поверхности, обработанной точением с асимметричными колебаниями инструмента, возрастает с увеличением подачи и зависит от коэффициента асимметрии цикла колебаний.

Увеличение глубины резания приводит к снижению качества обработанных поверхностей (рис. 2). Влияние глубины резания на шероховатость можно объяснить упругим восстановлением деформированного слоя металла обработанной поверхности.

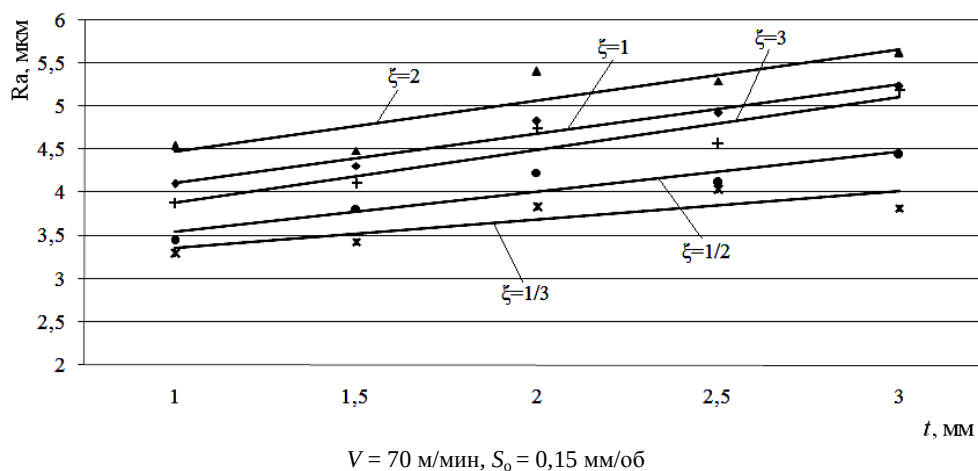


Рис. 2. Зависимость шероховатости от глубины резания

Скорость резания при обычном точении влияет на условия наростообразования, а следовательно и на шероховатость. При точении с вибрациями в связи с периодическим прекращением процесса резания условия для наростообразования отсутствуют, поэтому изменение скорости резания существенного влияния на шероховатость не оказывает.

Для определения математической зависимости шероховатости обработанных поверхностей от режимов резания реализован план полного факторного эксперимента. В качестве факторов приняты подача, глубина резания и скорость резания.

Математическую модель зависимости шероховатости от режимов резания в выбранных пределах варьирования для точения с коэффициентом асимметрии $\xi = 1/3$ получим в виде

$$Ra = -0,01064 + 17,17050 \cdot S_0 + 0,61261 \cdot t.$$

Аналогичные модели получены для процесса точения с другими коэффициентами асимметрии. Оценка этих моделей свидетельствует о том, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает подача. Зависимость шероховатости от коэффициента асимметрии носит нелинейный характер, о чем свидетельствуют данные, отображенные на рисунке 3.

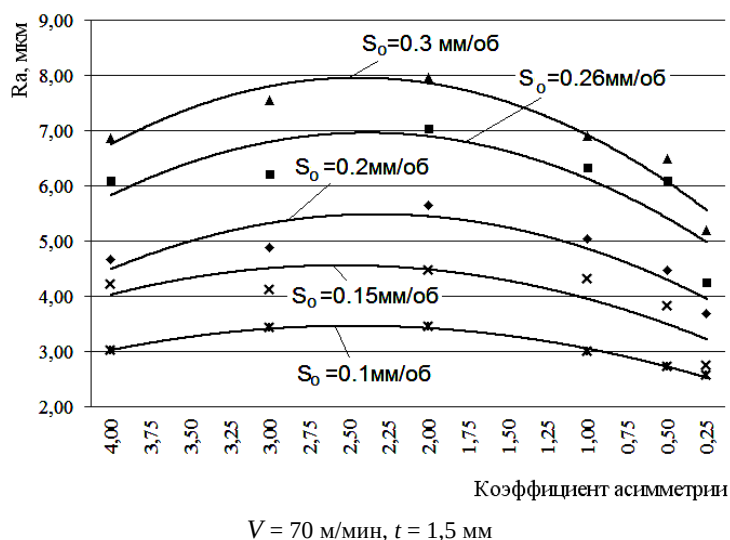


Рис. 3. Зависимость шероховатости от коэффициента асимметрии цикла

Графики рассматриваемой зависимости могут быть аппроксимированы квадратической функцией. Используя методику расчета, приведенную в [6], получены уравнения зависимости шероховатости от коэффициента асимметрии цикла для различных подач при обработке со скоростью резания $V = 70$ м/мин и глубиной $t = 1,5$ мм. Уравнение зависимости при подаче $S_0 = 0,15$ мм/об имеет вид

$$Ra = 2,9194 + 1,2882 \cdot \xi - 0,2528 \cdot \xi^2.$$

Результаты исследования говорят о том, что шероховатость поверхности, обработанной точением с асимметричными колебаниями инструмента, может быть уменьшена по сравнению с шероховатостью поверхности, полученной после вибрационного точения с гармоническими колебаниями. Так, при точении с коэффициентом асимметрии $\xi = 1/4$ шероховатость поверхности уменьшается на 15...25 %. Уменьшение шероховатости обусловлено в первую очередь уменьшением максимального расстояния между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки и, следовательно, максимальной толщины среза. При определенных режимах резания точение с коэффициентами $\xi < 1$ позволяет получать шероховатость поверхности, соответствующую чистовой обработке ($Ra = 2,5...3,2$ мкм).

Максимальное расстояние между траекториями движения инструмента на двух последовательных оборотах заготовки одинаково для коэффициентов асимметрии 2 и 1/2, 3 и 1/3, 4 и 1/4 и т.д. Однако шероховатость при точении с коэффициентом асимметрии меньше единицы, ниже, чем при точении с обратными им коэффициентами асимметрии. Эти результаты эксперимента обусловлены разницей в кинематике процесса обработки. При точении с колебаниями инструмента меняются кинематические углы инструмента. Передний кинематический угол резца при точении с $\xi < 1$ больше, чем при точении с $\xi > 1$. Изменение заднего кинематического угла имеет обратный характер. С увеличением переднего угла максимальная высота микронеровности обработанной поверхности уменьшается за счет уменьшения упругой и пластической деформации поверхностного слоя обрабатываемой детали. Уменьшение же заднего угла приводит к увеличению высоты микронеровности в связи с увеличением контакта задней поверхности с обработанной поверхностью, но это влияние на шероховатость поверхности незначительно [7].

Существенное влияние на шероховатость поверхности оказывает жесткость системы СПИЗ. Силы, возникающие в процессе точения, приводят к упругому отжиму инструмента от заготовки. В связи с тем, что силы резания, в частности радиальная составляющая силы P_y , имеют нестабильный характер, упругие деформации технологической системы также периодически изменяются. Увеличивающаяся сила резания стремится отжать заготовку от инструмента. В момент, когда сила резания приближается к минимальным значениям, уменьшаются и упругие деформации. При этом происходит врезание резца в заготовку и увеличение глубины впадины. Высокая шероховатость при точении с $\xi > 1$ обусловлена более значимыми деформациями системы. Профилограммы поверхностей, полученных точением с коэффициентами асимметрии более единицы, имеют периодические глубокие впадины, характерные концу периода отвода инструмента (рис. 4). При этом увеличивается максимальная высота микронеровности R_{max} .

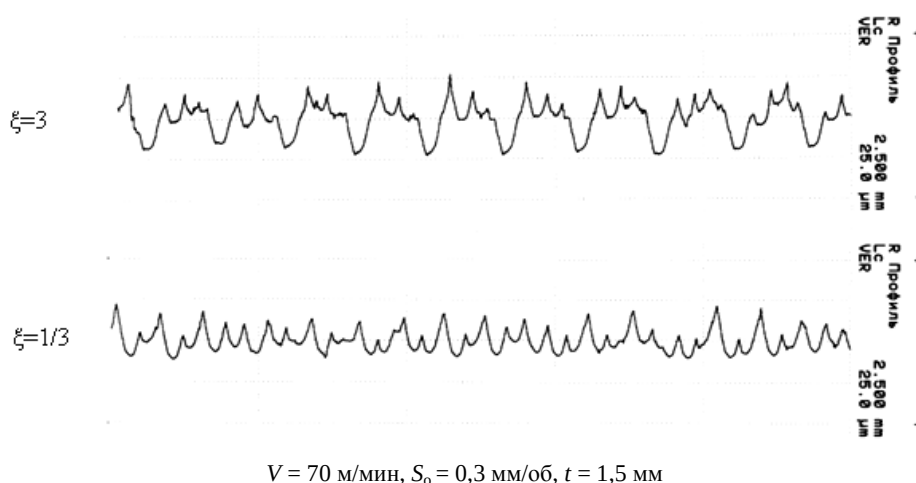


Рис. 4. Профилограммы поверхностей, обработанных точением с асимметричными колебаниями инструмента

Погрешности обработки обусловлены целым рядом технологических факторов, основными из которых являются геометрические неточности, упругие и тепловые деформации звеньев технологической

системы, упругие деформации материала детали под действием усилий закрепления, размерный износ режущего инструмента и внутренние напряжения в обрабатываемой детали [8]. Эти погрешности могут иметь место и при точении с асимметричными колебаниями.

На точность обработки при точении с асимметричными колебаниями инструмента могут влиять также факторы, связанные с самим вибрационным процессом. Оценку их влияния на точность обработки проведем по результатам контроля точности диаметральных размеров, отклонения от круглости и профиля продольного сечения. С этой целью обработана партия деталей из стали 45 диаметром 35 мм в количестве 100 штук.

Детали обработаны на следующих режимах резания:

- подача 0,15 мм/об;
- глубина резания 1,5 мм;
- скорость резания 70 м/мин.

Образцы обточены на длину 50 мм. Обработка проводилась точением с коэффициентом асимметрии $\xi = 1/3$.

Статистический анализ полученных результатов позволяет утверждать, что распределение контролируемых параметров подчиняется закону Гаусса. Основной характеристикой эмпирического распределения является среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра σ . Среднее квадратическое отклонение диаметрального размера σ_p составляет 0,0103 мм.

Оценка погрешностей формы обработанных образцов в поперечном и продольном сечениях проводилась в соответствии с [9]. В результате статистического анализа получены следующие данные:

- среднее квадратическое отклонение формы в поперечном сечении $\sigma_{ф.поп} = 0,002$ мм;
- среднее квадратическое отклонение формы в продольном сечении $\sigma_{ф.пр} = 0,0015$ мм.

Величина среднего квадратического отклонения суммарной погрешности формы может быть рассчитана по формуле

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{\sigma_{\phi_{поп}}^2 + \sigma_{\phi_{пр}}^2}.$$

Для экспериментальных данных

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{0,002^2 + 0,0015^2} = 0,0025 \text{ мм.}$$

Отношение среднего квадратического отклонения суммарной погрешности к величине среднего квадратического отклонения погрешности размера составляет

$$\frac{\sigma_{\phi}}{\sigma_p} = \frac{0,0025}{0,0103} = 0,24.$$

В этом случае, согласно [8], теоретическое поле рассеивания погрешности обработки

$$\omega_T = 6\sigma_p = 0,062 \text{ мм,}$$

что соответствует 9-му качеству точности.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие **выводы**:

1) минимальная амплитуда колебаний инструмента, достаточная для стружкодробления, увеличивается с ростом подачи и глубины резания. Действительная минимальная амплитуда больше теоретической, равной половине подачи на оборот, что связано с упругими деформациями системы СПИЗ. Так, для $S_o = 0,075 \dots 0,3$ мм/об, $V = 70$ м/мин и $t = 1,5$ мм минимальная амплитуда увеличивается в сравнении с теоретической на 5...50 %;

2) шероховатость поверхностей, обработанных точением с асимметричными колебаниями инструмента, имеет прямую зависимость от подачи и глубины резания и выше, чем после обычного точения на тех же режимах резания. Однако она может быть снижена по сравнению с вибрационным точением с гармоническими колебаниями. Так, при точении с коэффициентом $\xi = 1/4$ шероховатость при рассматриваемых режимах резания ($S_o = 0,1 \dots 0,3$ мм/об, $V = 70$ м/мин, $t = 1,5$ мм) уменьшается на 15...25 % по отношению с $\xi = 1$ и может достигать 2,5...3,2 мкм, что соответствует чистовой обработке;

3) точность размеров и формы обработанных поверхностей подчиняется нормальному закону распределения. При достаточной жесткости системы СПИЗ точность обработки точением с наложением

асимметричных колебаний инструмента может достигать 9...10 квалитетов точности, что соответствует получистовой и чистовой обработке на токарных станках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелег, В.К. Анализ методов и способов стружкодробления в процессе токарной обработки / В.К. Шелег, С.С. Данильчик // Машиностроение: респ. межвед. сб. науч. тр.; Белорус. нац. техн. ун-т; под ред. В.К. Шелега. – Минск, 2013. – С. 73–80.
2. Коновалов, Е.Г. Осциллирующее точение / Е.Г. Коновалов, А.В. Борисенко. – Минск: Изд-во Академии наук БССР, 1960. – 32 с.
3. Вульф, А.М. Резание металлов / А.М. Вульф. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
4. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
5. Данильчик, С.С. Кинематика точения с наложением асимметричных колебаний инструмента / С.С. Данильчик, В.К. Шелег // Наука и техника. – 2013. – № 4. – С. 16–21.
6. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.
7. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. школа, 1985. – 304 с.
8. Кораблев, П.А. Пути интенсификации точности обработки на металлорежущих станках в приборостроении / П.А. Кораблев. – М.: Машиностроение, 1974. – 120 с.
9. Муслина, Г.Р. Измерение и контроль геометрических параметров деталей машин и приборов: учеб. пособие / Г.Р. Муслина, Ю.М. Правиков; под общ. ред. Л.В. Худобина. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 220 с.

Поступила 14.07.2014

TURNING STRUCTURAL STEELS IMPOSED ON THE TOOL FEED ASYMMETRICAL VIBRATIONS

V. SHELEG, S. DANILCHIK

The process of turning structural steel overlay to file tool asymmetric vibrations. The study revealed that the minimum amplitude of oscillation tool sufficient for chip breaking increases with feed and depth of cut. The roughness of surfaces treated with asymmetric vibrations turning tool, has a direct relationship to the feed and cutting depth and higher than normal after turning on the same cutting conditions.

УДК 621.91.04

АНАЛИЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОФИЛЬНЫХ МОМЕНТОПЕРЕДАЮЩИХ СОЕДИНЕНИЙ

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

Дана характеристика методов формообразования производящих линий некруглых поверхностей по существенным признакам, определяющим форму инструментальных поверхностей и производящих элементов инструмента, их взаимодействие с номинальной поверхностью изделия при полном и частичном формообразовании. Предложен метод структурного описания схем профилирования в виде определителей их существенных признаков. Рассмотрены особенности схем профилирования некруглых поверхностей базовыми и комбинированными методами и примеры их реализации при механической обработке профильных деталей. Приведены рекомендации по выбору схем профилирования некруглых поверхностей при проектировании кинематики металлорежущих станков и построению их кинематической структуры с электромеханическими и мехатронными связями.

Введение. Цилиндрические и конические некруглые поверхности (НП) применяются в конструкциях деталей профильных моментопередающих соединений (ПМС). Деталь ПМС может быть ограничена одной или множеством конгруэнтных поверхностей, образующих некруглую (многогранную) моментопередающую поверхность с периодически повторяющимся профилем. Форма поперечного сечения НП зависит от количества граней (выступов), ограниченных дугами окружностей, синусоидальными и циклоидальными кривыми, линиями равной ширины и другими линиями. В ПМС обычно применяются поверхности с выпуклыми гранями [1].

Благодаря эксплуатационным и технологическим преимуществам ПМС эффективно заменяют традиционные шлицевые и шпоночные соединения для передачи крутящего момента. К эксплуатационным преимуществам ПМС относятся:

1) более высокая усталостная прочность профильных валов вследствие отсутствия концентраторов напряжений, присущих шлицевым валам, что позволяет при тех же габаритных размерах повысить прочность и долговечность ПМС. Это преимущество можно эффективно использовать при модернизации машин и механизмов, включающей замену шлицевого или шпоночного соединения профильным;

2) более высокая точность соединения вследствие того, что некоторые профили обладают свойством самоцентрирования под нагрузкой, обеспечивающим соосность сопряженных деталей при работе механизма. Благодаря этому при той же точности соединения точность его деталей может быть уменьшена на 1–2 квалитета, что снижает стоимость изделия;

3) меньше износ и уровень шума в механизме, так как под нагрузкой ПМС с зазором переходит в соединение с натягом.

Технологические преимущества ПМС обусловлены возможностью обрабатывать некруглые валы теми же высокопроизводительными методами, что и круглые (точением, шлифованием, поверхностно-пластическим деформированием и др.) Поэтому стоимость изготовления некруглых валов существенно меньше, чем шлицевых.

В зарубежном машиностроении ПМС применяются в металлорежущих станках, кузнечно-прессовом оборудовании, инструментальных системах металлорежущих станков, строительных, дорожных и сельскохозяйственных машинах, промышленных роботах, приборах и т.д. Примером эффективного применения профильных соединений в технологической оснастке служит система модульного инструмента «Coromant-Carto» фирмы Sandvik Coromant.

Тенденция к расширению использования ПМС в машиностроении обусловлена отмеченными выше их преимуществами. Однако в отечественном машиностроении ПМС применяются относительно редко, что связано с отсутствием соответствующего технологического оборудования и отработанных технологий изготовления деталей ПМС. В этой связи актуально решение теоретических и конструкторско-технологических задач, связанных с созданием станков и необходимого инструментального оснащения, методов и средств контроля профильных деталей. Одной из таких задач является выбор или синтез рациональных схем формообразования НП при функциональном проектировании и модернизации станочного оборудования.

Характеристика методов формообразования производящих линий. Согласно общим положениям теории формообразования поверхностей формирование НП включает ее профилирование и образование по длине, т.е. генерацию в процессе обработки производящих линий – образующей и направляющей. Каждая из производящих линий может быть образована базовыми методами копирования K_n , следа Sl , каса-

ния Kc , обката Ob [2] и комбинированными методами, например $(Kn+Cl)$, $(Ob+Cl)$ и др. [3], различающимися материальными носителями ее формы, универсальностью и сложностью реализации. Комбинированные методы характеризуются соответствующей совокупностью существенных признаков базовых методов и служат основой для синтеза комбинированных (совмещенных) методов обработки.

Каждый из методов формообразования характеризуются определенной совокупностью существенных признаков, представленных в таблице:

- форма производящих элементов инструмента (ПЭ) – линия L , точка T или множество точек $\{T_i\}$ и инструментальной поверхности (ИП), которой может быть плоскость Pl , цилиндрическая круглая Ck или некруглая Cn , коническая K поверхности, винтовая поверхность Vt , фасонная поверхность вращения ΦVr и др.;
- форма вспомогательных производящих линии (ВПЛ), которыми образуется линия методами касания и обката – окружность Ok , прямая Pr и кривая Kp линии;
- форма мгновенного контакта ПЭ с номинальной поверхностью – линия L или точка T ;
- характер взаимодействия ПЭ с номинальной поверхностью во времени (единовременное E , непрерывное H , прерывистое $П$) и результат взаимодействия в виде образованных линий и точек;
- вид формообразования ПЛ (полное, частичное).

Характеристика методов профилирования поверхностей

Существенные признаки	Методы профилирования производящих линий ПЛ			
	копирование Kn	следа Cl	касания Kc	обката Ob
Форма производящих элементов ПЭ инструмента	Линия L	Точка T Множество точек $\{T_i\}$	Множество точек $\{T_i\}$	Линия L
Инструментальная поверхность ИП	- Линейчатая незамкнутая поверхность L_{nm} - Поверхность вращения: - цилиндрическая C_{cp} - коническая K_{cp} - фасонная ΦVr			Плоскость Pl Цилиндрическая C Коническая K Винтовая Vt Фасонная вращения Φ_{cp}
Вспомогательные производящие линии ВПЛ			Окружность Ok Прямая Pr Кривая Kp	Прямая Pr Кривая Kp
Форма мгновенного контакта ПЭ с ПЛ номинальной НП	Линия L	Точка T	Точка T	Точка T
Характер взаимодействия ПЭ с номинальной НП во времени	Единовременное E	Непрерывное H	Прерывистое $П$	$H - (Obn)$ $П - (Obn)$
Результат взаимодействия ПЭ с ПЛ номинальной НП	Линия L	Линия L	Множество точек $\{T_i\}$	Линия $L - Obn$ Множество точек $\{T_i\} - Obn$
Вид формообразования ПЛ	Полное	Полное	Частичное	Полное – Obn Частичное – Obn

Полное формообразование при определенных условиях обеспечивается всеми указанными методами за исключением метода касания, а также комбинированными (совмещенными) методами.

Во всех схемах формообразования имеет место контакт ПЭ с НП, который характеризуется пространственными и временными параметрами. Контакт ПЭ, задаваемых множеством M_n , при формировании линии может быть линейным ($M_n \cap M_n = L$) или точечным ($M_n \cap M_n = T$), а во времени осуществляться единовременно (мгновенно) E , периодически (дискретно) $П$ и непрерывно H [4]. При методе обката взаимодействие ПЭ с номинальной НП может осуществляться как непрерывно $H (Obn)$, так и прерывисто $П (Obn)$.

Пространственная характеристика контакта (форма) определяется геометрическими параметрами производящих элементов и НП и их взаимным расположением, а временная – относительным движением. В частности, непрерывный контакт при поступательном движении осуществляется со скольжением (Hc), а при относительном движении качения – путем обката контактирующих элементов (Ho). Качение может

осуществляться одновременно со скольжением (Hco), что имеет место, например, при ротационном точении и ротационном выглаживании. Аналогично возможен прерывистый контакт со скольжением ($Пс$), обкатом ($Поб$) и их сочетанием ($Псоб$) или прерывистый мгновенный контакт ($МК$).

Результатом взаимодействия производящего элемента с формируемой линией может быть множество принадлежащих ей точек $\{Ti\}$ или линий $\{Li\}$ (при частичном формообразовании) или линия, конгруэнтная заданной ПЛ (при полном формообразовании). Вид формообразования (полное или частичное) зависит от вида отображения ПЭ на номинальную поверхность изделия, формы контакта между ними и характера их взаимодействия во времени. Полное формообразование линии возможно при отображении ПЭ на все точки формируемой линии.

Рассмотрим базовые методы формирования производящих линий по присущим им существенным признакам.

Профилирование НП методом копирования. Метод копирования относится к геометрическим методам формообразования производящих линий, так как материальным носителем формы образуемой линии является инструмент, обеспечивающий выполнение функции формообразования без формообразующего движения.

Характеристический образ инструмента может быть конгруэнтен либо всему профилю поверхности, либо одному из его участков. Поэтому ПЭ при методе копирования является линией, определяющая форму или режущей кромки (при обработке лезвийным инструментом), или образующей инструментальной поверхности (при обработке вращающимся инструментом). Производящий элемент в виде режущей кромки может принадлежать линейчатой незамкнутой инструментальной поверхности $Лнп$, например, при обработке НП призматическим фасонным резцом, или поверхности вращения (цилиндрической $ЦВр$, конической $КВр$, фасонной $ФВр$) при фрезеровании НП.

Благодаря единовременному взаимодействию ПЭ с номинальной поверхностью метод копирования обеспечивает полное формообразование ПЛ и поэтому характеризуется максимальной производительностью и упорядоченностью процесса формообразования. Однако одновременное образование всего профиля НП связано с применением специального инструмента, что обуславливает неуниверсальность данного метода и практически целесообразно в основном при обработке некруглых отверстий протяжками и прошивками.

Некруглые валы ПМС ограничены несколькими равномерно расположенными по окружности конгруэнтными участками, обработка которых при профилировании методом копирования осуществляется обычно последовательно специальными фасонными инструментами [5] при периодическом движении деления, что отрицательно влияет на производительность и точность формообразования и ограничивает область рационального применения этого метода.

Универсальность инструмента и высокая точность формирования производящих линий обеспечиваются методами кинематического профилирования.

Профилирование НП методом следа. На рисунке 1 представлены установленные по литературным и патентным источникам схемы профилирования НП методом следа. Формирование всех конгруэнтных участков профиля НП возможно одним или несколькими ПЭ. Производящий элемент в виде точки T (вершины резца) имеет однолезвийный инструмент (рис. 1, схемы 1–4), а в виде множества точек $\{Ti\}$ – многолезвийный инструмент, например, резцовая головка внешнего касания (рис. 1, схемы 5, 9), охватывающая резцовая головка (рис. 1, схема 6) или инструментальная цепь (рис. 1, схема 7) с равномерно расположенными по ее периметру режущими зубьями.

Функцию формообразования во всех схемах выполняет кинематика станка, что обеспечивает универсальность метода следа по форме образуемых линий, определяемой траекторией движения формообразования. Последняя зависит от вида и соотношения скоростей элементарных движений (вращательных B , поступательных $П$, качательных (возвратно-вращательных) K , осциллирующих (возвратно-поступательных) O , образующих движение формообразования. Как показано в таблице, контакт ПЭ с номинальной поверхностью в данном случае осуществляется в точке T , формирующей ПЛ поверхности. Единовременный характер взаимодействия ПЭ с НП обеспечивает при непрерывном перемещении ПЭ полное формообразование линии.

В формализованном виде схема профилирования описывается структурной формулой, состоящей из определителей метода профилирования ($Сл$), формы производящего элемента (точка T или множество точек $\{Ti\}$) и движения профилирования Φ , задающего его структуру, т.е. количество и вид взаимосвязанных элементарных движений. На рисунке 1 представлены применяемые и возможные схемы профилирования, которые описываются соответствующими структурными формулами:

$$1 - [Сл-T-\Phi(O_1O_2)]; 2 - [Сл-T-\Phi(O_1K_2)]; 3 - [Сл-T-\Phi(K_1K_2)]; 4 - [Сл-T-\Phi(B_1O_2)]; 5 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1B_2)];$$

$$6 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1B_2)]; 7 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1П_2)]; 8 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1B_2)]; 9 - [Сл-\{Ti\}-\Phi(B_1B_2O_3)].$$

Определитель схемы профилирования НП входит в качестве компонента в структурную формулу соответствующей кинематической схемы ее обработки [3].

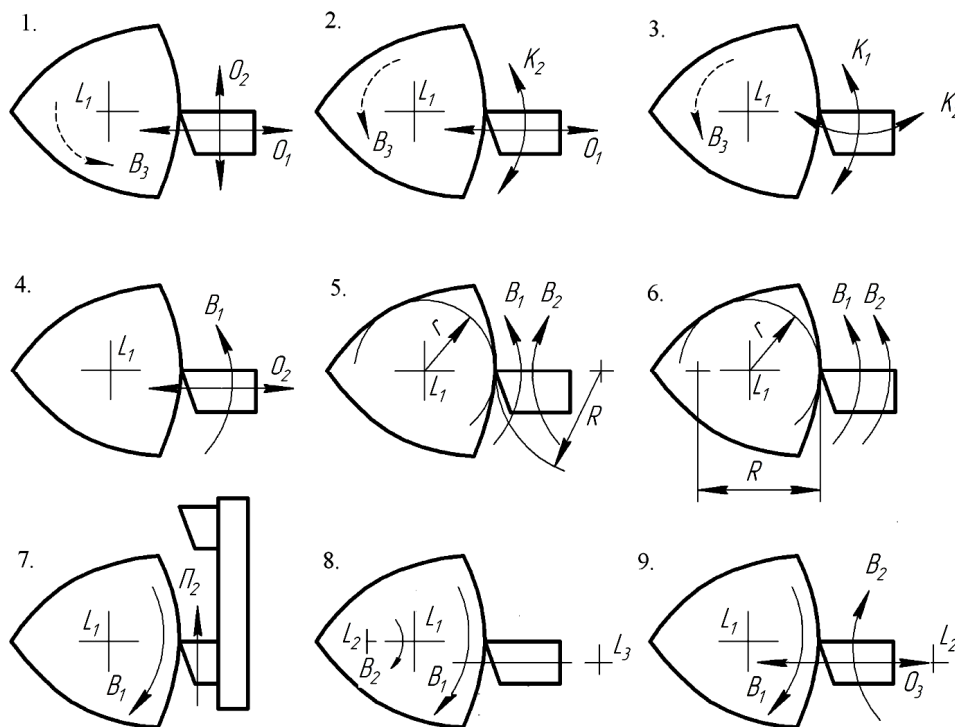


Рис. 1. Схемы профилирования некруглых поверхностей методом следа

Недостатком схем профилирования, основанных на переменных по направлению движениях (рис. 1, схемы 1–4), являются знакопеременные инерционные нагрузки в осуществляющих их механизмах, что обуславливает низкую производительность обработки и отрицательно влияет на долговечность станка. Кроме того, для последовательного формирования конгруэнтных участков профиля требуется движение деления – периодический поворот заготовки B_3 на угол между соседними участками профиля или сообщение инструменту движения ориентации, что усложняет конструкцию станка и отрицательно влияет на точность обработки. Схема 1 применяется для профилирования НП при электроэрозионной обработке некруглых отверстий проволочным электродом. Она может найти применение также при их обработке энергетическим лучом (лазерная и гидроабразивная резка).

В схеме 4 процесс деления осуществляется непрерывно движением B_1 , входящим в движение профилирования $\Phi_v(B_1O_2)$, что позволяет упростить кинематику формообразования. Несмотря на относительно низкую производительность, ввиду простоты реализации и универсальности по форме обрабатываемых поверхностей, схема 4 достаточно широко применяется в специальных и модернизированных станках для обработки как наружных, так и внутренних НП.

Преимуществом схем 5–8 является отсутствие реверсивных движений, что важно для обеспечения производительной обработки. Схемы 5 и 6 получили наибольшее применение при обработке некруглых валов соответственно по встречной и попутной схемам резания резцовыми головками внешнего и внутреннего касания. Кроме конструкции инструмента они различаются установкой расстояния между осями L_1 и L_2 заготовки и инструмента. Если при обработке по схеме 5 оно равно сумме радиуса R резцовой головки и радиуса r вписанной в профиль НП окружности, то при схеме 6 – разности их значений. Эти схемы реализуются на станке модели BC50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» [6], а схема 5 – на станке-профилаторе фирмы WERA (ФРГ).

На схеме 8 основано планетарное точение некруглых валов на специальных станках, при котором заготовка совершает согласованные вращательные движения B_1 и B_2 вокруг параллельных осей L_1 и L_2 , т.е. планетарное движение [3]. Обработка НП по схеме 9 осуществляется вращающейся головкой внешнего касания, резцам которой сообщается в радиальном направлении дополнительное движение O_3 , позволяющее управлять формой профиля НП.

Недостатком большинства схем профилирования НП методом следа является изменение в широком диапазоне рабочих углов режущей части инструмента, что ограничивает область применения этого метода по форме обрабатываемых НП.

Профилирование НП методом касания. При профилировании методом касания линия формируется как касательная к множеству ВПЛ – траекторий точечных ПЭ, обычно в виде окружностей O_k (при обработке вращающимися инструментами), прямых Pr (при обработке поступательно перемещающимися инструментами) и кривых Kp линий переменной кривизны, например, циклоидальных. Некоторые из схем профилирования методом касания представлены на рисунке 2.

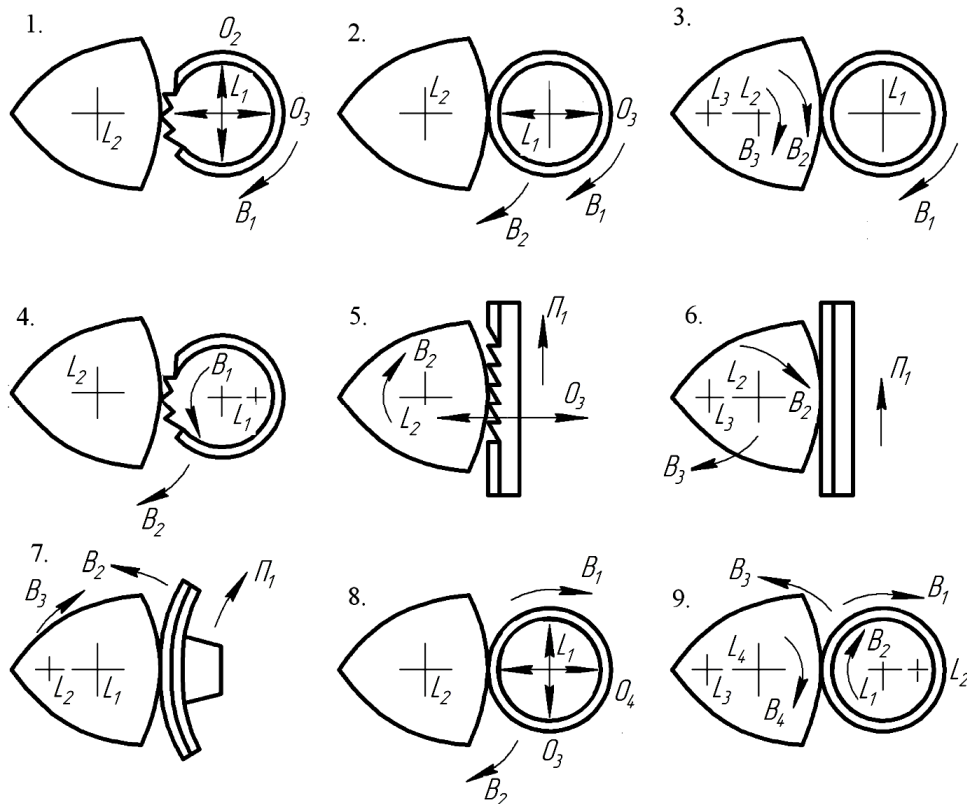


Рис. 2. Схемы профилирования некруглых поверхностей методом касания

Вспомогательные производящие линии расположены с определенным шагом вдоль принадлежащей номинальной поверхности формируемой линии, поэтому метод касания обеспечивает частичное ее формообразование в виде множества отдельных точек. Точность формообразования повышается при увеличении числа ВПЛ, что характерно при обработке абразивным инструментом, режущие зерна которого образуют множество хаотично расположенных ВПЛ.

Вспомогательная производящая линия представляет траекторию движения формообразования, осуществляемого со скоростью резания (движения Φ_v) точечным производящим элементом, а ее перемещение вдоль формируемой линии обеспечивается сложным исполнительным движением со скоростью подачи, т.е. движением Φ_s . Таким образом, схемы профилирования методом касания различаются формой ВПЛ и структурой исполнительных движений Φ_v и Φ_s .

В соответствии с таблицей структурная формула схемы профилирования методом касания в общем случае должна включать определители метода профилирования (Kc), формы ВПЛ (O_k , Pr , Kp) и формообразующих движений Φ_v и Φ_s . Исходя из этого изображенные на рисунке 2 схемы профилирования описываются следующими структурными формулами, характеризующими форму ВПЛ, метод и кинематику формообразования:

$$1 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(O_2O_3)]; \quad 2 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2O_3)]; \quad 3 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2B_3)];$$

$$4 - [Kc-O_k-\Phi_{vs}(B_1B_2)]; \quad 5 - [Kc-Pr-\Phi_v(\Pi_1), \Phi_s(B_2O_3)]; \quad 6 - [Kc-Pr-\Phi_v(\Pi_1), \Phi_s(B_2B_3)];$$

$$7 - [Kc-Kp-\Phi_v(\Pi_1), \Phi_s(B_2B_3)]; \quad 8 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2O_3O_4)]; \quad 9 - [Kc-O_k-\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2B_3B_4)].$$

Схема 1 рекомендуется для обработки коротких наружных и внутренних НП на фрезерных станках с ЧПУ. Схема 2 получила широкое применение для обработки НП на шлифовальных станках с копировальной или числовой системой управления.

Совмещение движений Φ_v и Φ_s позволяет существенно упростить кинематику формообразования и, соответственно, станка, что важно при создании станков для обработки НП на базе станков другого технологического назначения. Этот принцип реализован в схеме 4, при которой профилирование НП осуществляется эксцентрично установленной круглой или некруглой дисковой фрезой [3] сложным совмещенным движением $\Phi_{vs}(B_1B_2)$. Схема 4 следует из схемы 2 при перенесении функции осциллирующего движения O_3 на инструмент за счет, например, вращения B_1 дисковой фрезы вокруг оси L_1 , не совпадающей с ее геометрической осью, или применения некруглой фрезы. В обоих случаях перемещение ПЭ в радиальном направлении обеспечивается не кинематически, а геометрически, т.е. профилирование осуществляется за счет «конструктивной подачи» режущих и формообразующих элементов инструмента. Данная схема профилирования некруглых валов реализована в станке модели BC50 [6].

В схемах 5 и 6 профиль формируется как касательная к множеству прямых ВПЛ в их относительном движении, образованных точечными ПЭ инструментальной цепи (схема 5) или абразивной ленты (схема 6). Достоинство этих схем – независимость геометрии формируемого профиля от параметров инструмента, что не характерно для других, представленных на рисунке 2 схем профилирования НП.

Схема 8 применяется на специальном шлифовальном станке AFD 330-1500 фирмы FORTUNA (ФРГ) [7] для обработки некруглых валов, у которого в процессе обработки шлифовальная бабка совершает одновременно согласованные с вращением B_2 заготовки возвратно-поступательные движения O_3 и O_4 в горизонтальной и вертикальной поверхностях.

Недостатком всех схем профилирования методом касания является возможность только частичного формообразования с отклонениями образованной линии от номинальной в виде гребней. Уменьшение их высоты для обеспечения требуемой точности обработки достигается совмещением схем частичного формообразования путем многократного ее профилирования за время одного хода множеством семейств ВПЛ, смещенных относительно друг друга, что обеспечивается кинематическим или геометрическим методами. В результате число ВПЛ, формирующих ПЛ поверхности, возрастает в P раз, благодаря чему огранка профиля уменьшается в P^2 раз по сравнению с однократным профилированием. Технически просто это обеспечивается при применении дисковых фрез с винтовой формой режущих лезвий.

Профилирование НП методом обката. Производящая линия формируется методом обката как огибающая множества ВПЛ – режущих лезвий или образующих исходной ИП (рис. 3).

Как показано в таблице, к существенным признакам этого метода относятся:

- форма ВПЛ (характеристический образ инструмента) – прямая Pr или кривая Kp , которая может быть выпуклой или вогнутой;
- вид ИП, которой принадлежат ВПЛ – плоскость Pl , цилиндрическая C или коническая K круглая или некруглая, замкнутая или не замкнутая; винтовая Vm , фасонная поверхность вращения ΦVr , комбинированная, как сочетание указанных типов поверхностей;
- структура движения обкатки в зависимости от количества и вида составляющих его элементарных движений.

Указанные существенные признаки в виде соответствующих определителей отражаются в структурных формулах схем профилирования.

Некоторые из схем профилирования НП, различающиеся указанными существенными признаками, приведены на рисунке 3. Соответствующие им структурные формулы имеют вид:

$$1 - [Об-Pr(Pl)-\Phi(B_1B_2)]; 2 - [Об-Pr(Pl)-\Phi(B_1O_2)]; 3 - [Об-Kp(C)-\Phi(B_1P_2)]; 4 - [Об-Kp(Cn)-\Phi(B_1P_2)];$$

$$5 - [Об-Kp(Cn)-\Phi(B_1B_2)]; 6 - [Об-Vm(Ck)-\Phi(B_1B_2)]; 7 - [Об-Pr(Ck)-\Phi(B_2O_3)]; 8 - [Об-Pr(Ck)-\Phi(B_2B_3)];$$

$$9 - [Об-Pr(Cn)-\Phi(B_1B_2)]; 10 - [Об-Kp(\Phi Vr)-\Phi(B_2P_3)];$$

$$11 - [Об-Kp(Vm)-\Phi(B_1B_2)]; 12 - [Об-(Kp(Cn) + Pr(Cn)) - (B_1B_2)].$$

Профилирование методом обката в зависимости от характера выполнения движения обката во времени (непрерывно H – (Обн) или прерывисто P – (Обп)) обеспечивает соответственно полное или частичное формообразование производящей линии, так как в первом случае результатом взаимодействия ПЭ с ПЛ номинальной поверхности является линия, а во втором – множество точек (см. таблицу). При частичном формообразовании сформированная линия отличается от номинальной, что выражается в образовании гребней, для уменьшения высоты которых вспомогательные линии должны быть прямыми или вогнутыми.

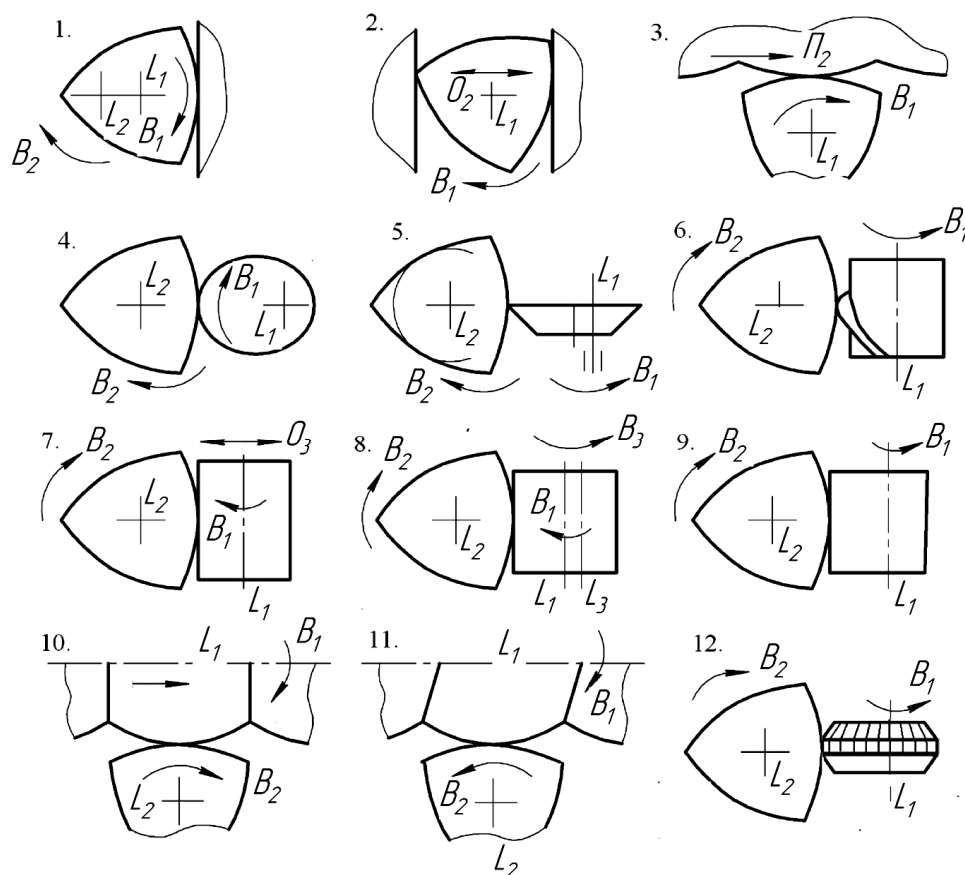


Рис. 3. Схемы профилирования некруглых поверхностей методом обката

Профилирование НП по схемам 1 и 2 осуществляется производящими элементами, расположенными на плоской ИП. Профилирование по схеме 2 одновременно двумя параллельно расположенными ИП эффективно для изделий с РК-профилем, благодаря особенностям его геометрии – постоянству расстояния между двумя любыми параллельными к нему касательными.

Некруглый профиль по схеме 3 формируется расположенным на незамкнутой цилиндрической ИП криволинейным ПЭ при воспроизведении движением $\Phi(B_1\Pi_2)$ между инструментом и заготовкой реющего зацепления. Данная схема реализуется сложными по конструкции станком и инструментом.

Заслуживают внимания схемы 4–6, характерным для которых является профилирование с использованием конструктивной подачи инструмента, что упрощает их реализацию. В схемах 4 и 5 это достигается за счет эксцентричной установки круглого резца или применения некруглого резца, а в схеме 6 благодаря винтовой форме режущей кромки, обеспечивающей перемещение точки контакта в тангенциальном направлении и изменение расстояния от нее до оси L_2 вращения заготовки.

Профилирование НП по схемам 7 и 8 осуществляется цилиндрическим или коническим инструментом за счет сложного движения соответственно $\Phi(B_2O_3)$ и $\Phi(B_2B_3)$.

Схема 9 образуется из схемы 7 при перенесении функции кинематики формообразования на инструмент, что практически реализуется при эксцентричной установке цилиндрической фрезы относительно оси L_1 ее вращения. В этом случае исключается осциллирующее движение O_3 , функция которого (перемещение режущей кромки в радиальном направлении в соответствии с формируемым профилем) обеспечивается вследствие переменного радиуса исходной инструментальной поверхности относительно оси вращения инструмента, т.е. за счет «конструктивной подачи». Схема 9 реализуется на станках с двумя кинематически связанными шпинделями, несущими инструмент и заготовку, например, на зубошлицефрезерных станках при возможности настройки требуемого отношения их угловых скоростей. Благодаря прямолинейной форме ПЭ в схемах 7–9 исключается влияние диаметра инструмента на точность профилирования, что является их существенным преимуществом.

В отличие от рассмотренных схем, профилирование заданной НП кривой линией, принадлежащей цилиндрической незамкнутой ИП (схема 3), фасонной поверхности вращения (схема 10) или винтовой

поверхности (схема 11), возможно специальным инструментом (соответственно рейкой, фасонной и червячной фрезами), предназначенным для обработки конкретной НП. Это обуславливает неуниверсальность этих схем, усложняет их реализацию и ограничивает область рационального применения.

Схема 12 основана на совмещении процессов частичного и полного формообразования ПЛ, осуществляемых соответственно многолезвийным инструментом и ротационным резцом с непрерывной режущей кромкой. В процессе обработки по совмещенной схеме срез большей части металла осуществляется многолезвийным инструментом, а окончательная обработка – ротационным резцом. Совмещение методов формообразования ПЛ позволяет повысить эффективность процессов обработки благодаря объединению преимуществ базовых методов, в данном случае обеспечение надёжного стружкодробления независимо от вязкости обрабатываемого материала и высокой точности профилирования.

Рассмотренные выше методы профилирования НП обеспечивают формирование образующей поверхности. Аналогично базовыми или комбинированными методами формируется ее направляющая. Сочетанием методов формирования обеих производящих линий при условии, что темп генерации образующей выше, чем направляющей [2; 4], определяется метод формообразования НП.

Реализация схем обработки НП при функциональном проектировании станка. Реализация схем обработки на этапе функционального проектирования станка связана с синтезом рациональной кинематики формообразования, кинематической схемы обработки и его структурной схемы. Решение этих задач основано на универсальных принципах [8], из которых применительно к НП важны следующие:

- перенесение функции кинематики формообразования на инструмент за счет его конструктивной подачи, что позволяет упростить кинематическую схему обработки и соответственно кинематику станка;
- синтез структуры исполнительных движений, обеспечивающей благоприятные условия резания и работы механизмов станка за счет исключения реверсивных движений исполнительных органов, замены возвратно-поступательных движений вращательными;
- совмещение исполнительных движений формообразования и деления для упрощения кинематической схемы обработки и повышения производительности;
- задание рационального сочетания скоростей и направлений элементарных движений;
- рациональное распределение элементарных движений между инструментом и заготовкой для повышения универсальности схемы обработки.

Рациональными по возможности реализации являются схемы профилирования, которые осуществляются минимальным количеством нереверсивных движений. Из рассмотренных схем профилирования НП методом следа к ним относятся схемы, основанные на двух согласованных вращательных движениях, оба из которых могут сообщаться заготовке (планетарное точение НП) или инструменту, совершающему планетарное движение вокруг неподвижной заготовки, а также при сообщении одного вращательного движения заготовке, а другому инструменту в виде резцовой головки (рис. 1, схемы 5, 6). Благодаря исключению планетарного движения инструмента или заготовки последняя схема отличается универсальностью и более простой реализацией.

Из методов касания из тех же соображений предпочтительна схема обработки некруглых валов эксцентрично установленной круглой или некруглой дисковой фрезой, вращательное движение которой согласовано с вращением заготовки (рис. 2, схема 4). Для окончательной обработки рекомендуется обработки на шлифовальных станках (рис. 2, схема 2).

Из методов обката предпочтительными являются имеющие одинаковую кинематику схемы профилирования НП эксцентрично установленным ротационным резцом (рис. 3, схема 5), резцом с винтовой режущей кромкой (рис. 3, схема 6) и комбинированным инструментом в виде эксцентрично установленных круглого резца и угловой фрезы (рис. 3, схема 12).

Таким образом, на основе анализа схем профилирования некруглых цилиндрических поверхностей для их реализации рекомендуются схемы обработки резцовыми головками, эксцентрично установленными дисковой и цилиндрической фрезами, ротационными инструментами и инструментом с винтовой режущей кромкой. Общим для них является то, что профилирование НП осуществляется двумя согласованными вращательными движениями инструмента и заготовки, составляющими движение профилирования. Общность кинематики формообразования позволяет реализовать эти схемы обработки на одном станке.

Структурные схемы станков для реализации этих схем обработки приведены на рисунке 4.

На рисунке 4, а изображена структурная схема станка с электромеханической кинематической связью между инструментальным шпинделем, совершающим вращение B_2 , и шпинделем изделия, совершающим движение B_1 . Вращение шпинделей осуществляется от синхронных электродвигателей соответственно M_1 и M_2 переменного тока с частотным регулированием, подключенных к общему преобра-

Разработаны кинематические структуры станков для обработки цилиндрических и конических некруглых деталей с электромеханическими и мехатронными связями между исполнительными органами как основа проектирования их кинематики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чарнко, Д.В. Профильные соединения валов и втулок в машиностроении / Д.В. Чарнко, А.И. Тимченко // Вестн. машиностроения. – 1981. – № 1. – С. 33–35.
2. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
3. Данилов, В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием / В.А. Данилов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 264 с.
4. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 257 с.
5. Шитников, А.С. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки наружного РК-профиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / А.Н. Шитиков; Курск. гос. техн. ун-т. – Тула, 2007. – 20 с.
6. Данилов, В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер-механик. – 2003. – № 3(20). – С. 26–31.
7. Тимченко, А.И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений (Обзор) А.И. Тимченко. – М.: Изд. «Станкин», 1988. – 160 с.
8. Данилов, В.А. Методологические основы синтеза кинематики формообразования и кинематических схем обработки при функциональном проектировании станочного оборудования / В.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – С. 2–10.

Поступила 15.07.2014

ANALYSIS AND REALIZATION OF METHODS OF SHAPING NON-CIRCULAR SURFACES OF PROFILED TORQUE TRANSMITTING CONNECTION

V. DANILOV, A. DANILOV

The article presents the characteristics of the methods of non-circular surfaces forming. Patterns of tool interaction with a nominal surface of the product with the full and partial shaping are considered. Method of structural description of surface profiling schemes is proposed. Recommendations regarding the selection of profiling schemes of non-circular surfaces in the design of machine tools are given.

УДК 621.992.4

**РАСШИРЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТАНКА С МЕХАНИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЧЕРВЯКОВ ЧАШЕЧНЫМ РЕЗЦОМ**

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

Рассматривается конструктивная особенность двухшагового червяка, сопрягающегося с одношаговым червячным колесом. Разношаговость такого червяка по противоположным сторонам профиля обеспечивается расположением его витка на конической начальной поверхности. Обосновывается целесообразность расширения технических возможностей кинематической структуры станка для обработки одношаговых червяков чашечным резцом посредством возможности нарезания двухшаговых червяков с конической начальной поверхностью. Рассматриваются условия математического сложения двух движений на одном исполнительном органе, и на этой основе предлагается бездифференциальный вариант модернизации кинематической структуры станка с общим электродвигателем для нарезания одношаговых червяков. Разрабатывается вариант модернизации структурной схемы станка с раздельными электродвигателями для групп формообразующих движений. Рассматривается методика настройки обеих структурных схем.

Введение. В конце 50-х годов прошлого столетия была разработана двухшаговая червячная передача (дуплекс-пара), позволяющая регулировать боковой зазор посредством осевого смещения червяка. Такие передачи используют в червячных парах, от которых требуется высокая кинематическая точность, например, в реверсируемых, отсчетных и делительных механизмах металлорежущих станков. В дуплекс-паре двухшаговый червяк с цилиндрической начальной поверхностью его витков находится в зацеплении с двухшаговым червячным колесом. В [1] предложена менее трудоемкая и более технологичная червячная передача, состоящая из двухшагового червяка и взаимодействующего с ним традиционного одношагового червячного колеса. Разношаговость червяка [2] данной передачи обусловлена заменой цилиндрической начальной поверхности его витков конической. Шаг витка такого червяка по противоположным сторонам его профиля зависит от угла расположения образующей начальной конической поверхности [3].

Постановка задачи. В единичном производстве нарезать двухшаговый червяк с начальной конической поверхностью можно на токарно-винторезном станке с конусной линейкой. На этом станке настройка на шаг витка червяка осуществляется поворотом линейки на угол наклона образующей начальной поверхности. Существенный недостаток такого вида обработки – низкая производительность, так как процесс нарезания червяка осуществляется при значительном количестве проходов не менее чем тремя последовательно используемыми резцами.

В серийном производстве обработку традиционных одношаговых червяков осуществляют чашечным резцом в виде зубчатого колеса с профилем зуба, форма которого является сопряженной при обкате с профилем резьбы нарезаемого червяка. Для этого используют специализированные станки с механическими связями [4]. Формообразующая часть таких станков содержит только структуру для нарезания одношаговых червяков, выполненную по дифференциальной схеме. Представляется целесообразным расширение технических возможностей станков данного типа посредством модернизации их кинематической структуры для обеспечения возможности обработки также и двухшаговых червяков с конической начальной поверхностью его витков.

Модернизация кинематической структуры станка для нарезания червяков. В основу методики модернизации положен принцип кинематического воспроизведения траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности червяка при его обработке. На рисунке 1 приведен бездифференциальный вариант модернизации структурной схемы специализированного станка для нарезания червяков чашечным резцом, обеспечивающий возможность обработки двухшаговых червяков.

Кинематическая структура станка включает двухэлементарную группу обката $\Phi_v(B_1B_2)$ и трехэлементарную винторезную группу $\Phi_s(B_3П_4П_5)$, связанные между собой электродвигателем. В кинематической структуре станка не предусмотрен планетарный дифференциал для физического сложения элементарных движений B_2 и B_3 на шпинделе заготовки, входящем в обе формообразующие группы. Слагаемые движения имеют одинаковую скоростную характеристику, продолжительность их одинакова и создаются они одним электродвигателем. Названные условия обеспечивают математическое сложение указанных движений на общем исполнительном органе – шпинделе заготовки. В этом случае исполнительные движения можно преобразовать к виду $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$ и $\Phi_s(П_4П_5)$.

подачи, как правило, выполняют в виде гитар сменных зубчатых колес. Нормируемыми параметрами при обработке являются скорость резания, задаваемая по круговой частоте заготовки (движение B_2), и продольная подача инструмента (движение $П_4$).

Орган настройки i_x . При нарезании червяка за один оборот заготовки (движение B_2) чашечный резец совершает k/z оборотов (движение B_1) и перемещается на величину s , мм (движение $П_4$). Для получения винтовой линии червяка при перемещении чашечного резца на величину s заготовка должна дополнительно повернуться на s/T оборота (движение B_3), что соответствует дополнительному повороту чашечного резца на величину $+(k/z) \cdot (s/T)$. Следовательно, расчетные перемещения (РП) для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы обката $\Phi_v(B_1B_2 + B_3)$:

$$1 \text{ оборот шпинделя заготовки } (B_2 + B_3) \rightarrow k/z (1 + s/T) \text{ оборота чашечного резца } (B_1),$$

где k – число заходов нарезаемого червяка; z – число зубьев чашечного резца; s – подача; T – шаг винтовой линии нарезаемого червяка.

Уравнение кинематической цепи (УКЦ) станочного зацепления:

$$k/z(1 + s/T) = 1 \cdot c_1 \cdot i_x,$$

где c_1 – произведение передаточных отношений механических передач кинематической цепи.

Формула настройки (ФН):

$$i_x = c_1 \cdot z/k (1 + s/T).$$

Орган настройки i_y . Расчетные перемещения для расчетной цепи, совпадающей с внутренней связью группы подачи $\Phi_s(П_4П_5)$, составят

$$S_{np} \text{ перемещение резца в движении } П_4 \rightarrow S_{non} \text{ перемещение резца в движении } П_5,$$

где S_{np} – нормируемая продольная подача; $S_{non} = S_{np} \cdot \operatorname{tg} \epsilon$ (ϵ – угол наклона образующей начальной поверхности червяка).

Уравнение кинематической цепи станочного зацепления имеет следующий вид:

$$S_{non} = S_{np} \cdot c \cdot 1/P_{TB1} \cdot i_y \cdot P_{TB2}.$$

Формула настройки:

$$i_y = (S_{non}/S_{np}) \cdot (P_{TB1}/c \cdot P_{TB2}) = c_2 \cdot \operatorname{tg} \epsilon.$$

где $c_2 = (P_{TB1}/c \cdot P_{TB2})$ – константа модели станка; c – произведение передаточных отношений постоянных механических передач расчетной цепи.

Угол ϵ наклона образующей начальной поверхности червяка определяется по формуле [3]:

$$\epsilon = \arctg (\Delta/2 \operatorname{tg} \alpha_0),$$

где $\Delta = a\pi m/l_p$ – коэффициент приращения шага; a – коэффициент допустимого износа; l_p – дополнительная длина червяка; α_0 – угол зацепления.

Коэффициент допустимого износа зависит от знаменателя стандартного ряда модулей. При знаменателе ряда, равном 1,06, коэффициент $a = 0,03$. Дополнительная длина l_p является конструктивным признаком двухшаговых червяков. Для станочных делительных передач $l_p = 10 \dots 15$ мм.

Орган настройки i_v . Расчетная цепь связывает электродвигатель M_1 со шпинделем 6 заготовки. Поэтому РП имеют вид:

$$n_{M1}, \text{ мин}^{-1}, \text{ круговая частота электродвигателя} \rightarrow n_{шп}, \text{ мин}^{-1}, \text{ круговая частота шпинделя 6.}$$

Уравнение кинематической цепи:

$$n_{шп} = n_{M1} \cdot c_3 \cdot i_v.$$

Формула настройки:

$$i_v = n_{шп}/n_{M1} \cdot c_3,$$

где c_3 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Орган настройки i_s . Расчетная цепь связывает шпиндель 6 заготовки с TB_1 продольного суппорта 8. Поэтому РП имеют вид:

$$1 \text{ оборот шпинделя заготовки} \rightarrow s \text{ мм перемещения продольного суппорта 8.}$$

Уравнение кинематической цепи:

$$s = 1 \cdot c_4 \cdot i_s \cdot t_{TB1},$$

где c_4 – произведение передаточных отношений постоянных передач расчетной цепи.

Формула настройки:

$$i_s = s / c_4 \cdot t_{TB1}.$$

Станок работает следующим образом. После наладки органов настройки и установки обрабатываемой заготовки по линии центров станка по циклу обработки включается электродвигатель M_1 . Движение от электродвигателя по внешней связи группы скорости резания через звено соединения связей 3 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель чашечного резца получает вращательное движение B_1 , а шпиндель заготовки – движение $B_2 + B_3$. Согласованные движения шпинделей воспроизводят профиль червяка. Одновременно при включенных муфтах 9 и 11 движение от электродвигателя по внешней связи группы подачи через звено соединения связей 10 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге продольный суппорт 8 и поперечный суппорт 13, несущие шпиндель червячного резца, получают движения Π_4 и Π_5 соответственно. Функциональная связь этих движений обеспечивает перемещение траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности витков червяка. В итоге шаг витка червяка по противоположным сторонам его профиля будет соответствовать выражению:

$$P_{\phi, m} = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha_0 / \cos(\alpha_0 \pm \varepsilon),$$

где $P_{\phi, m}$ – соответственно больший и меньший шаги витка; α_0 – угол зацепления; ε – угол наклона образующей начальной поверхности; знаки «+» и «–» относятся соответственно к большему и меньшему шагу.

На станке можно обрабатывать также одношаговые червяки и глобоидные червяки. При обработке одношагового червяка посредством муфты 11 отсоединяется от привода подачи тяговый вал TB_2 поперечного суппорта 13. В итоге двухэлементарная формообразующая группа подачи $\Phi_s(\Pi_4 \Pi_5)$ преобразуется в одноэлементарную $\Phi_s(\Pi_4)$. Вывод ФН для органа настройки i_s этой группы аналогичен рассмотренному выше. При нарезании глобоидного червяка посредством муфты 9 отсоединяется от привода подачи тяговый вал TB_1 . В итоге формообразующая группа скорости резания (обката) преобразуется к виду $\Phi_v(B_1 B_2)$, а двухэлементарная группа подачи преобразуется в группу врезания $\Phi_s(\Pi_5)$. Вывод ФН для органа настройки i_s этой группы осуществляется на основе следующих РП:

1 оборот шпинделя заготовки $\rightarrow$ s мм перемещения поперечного суппорта.

Современная тенденция при проектировании металлорежущих станков с механическими связями – оснащение формообразующих кинематических групп индивидуальными управляемыми, например, асинхронными или синхронными электродвигателями с использованием частотных преобразователей.

На рисунке 2 приведен вариант модернизации структурной схемы станка для нарезания червяков чашечным резцом с раздельным приводом формообразующих групп.

Кинематическая структура станка включает двухэлементарную группу обката $\Phi_v(B_1 B_2)$ и трехэлементарную винторезную группу $\Phi_s(B_3 \Pi_4 \Pi_5)$. Внутренние связи кинематических групп соединены планетарным суммирующим механизмом (планетарным дифференциалом) 5 для физического сложения двух вращательных движений на шпинделе заготовки, являющимся исполнительным органом обеих групп.

Группа $\Phi_v(B_1 B_2)$ воспроизводит зацепление червячной передачи. Ее внутренняя связь:

$$B_1 \rightarrow \text{шпиндель 1 чашечного резца} \rightarrow 2 \rightarrow \text{реверс } R_1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow i_x \rightarrow 7 \rightarrow \\ \rightarrow \text{шпиндель 8 заготовки} \rightarrow B_2.$$

Внешняя связь:

$$M_1 \rightarrow 9 \rightarrow 3 \text{ (звено соединения с внутренней связью)}.$$

Группа настраивается на траекторию органом настройки i_x ; на скорость (резания) – частотным преобразователем, управляющим электродвигателем M_1 ; на направление – реверсом R_1 .

Группа $\Phi_s(B_3 \Pi_4 \Pi_5)$ осуществляет перемещение траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности витков червяка. Ее внутренняя связь содержит две структурные цепи.

Первая цепь:

$$B_3 \rightarrow \text{шпиндель 8 заготовки} \rightarrow 7 \rightarrow i_x \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow i_y \rightarrow 11 \rightarrow R_2 \rightarrow 12 \rightarrow TB_1 \rightarrow \\ \rightarrow \text{продольный суппорт 13} \rightarrow \Pi_4.$$

Вторая цепь:

$$\Pi_4 \rightarrow \text{продольный суппорт 13} \rightarrow TB_1 \rightarrow 12 \rightarrow R_2 \rightarrow 11 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow i_z \rightarrow 16 \rightarrow TB_2 \rightarrow \\ \rightarrow \text{поперечный суппорт 17} \rightarrow \Pi_5.$$

Внешняя связь:

$$M_2 \rightarrow 18 \rightarrow 14 \text{ (звено соединения связей для второй цепи)} \rightarrow 11 \text{ (звено соединения связей для первой цепи)}.$$

Группа настраивается на траекторию органами настройки (гитары сменных зубчатых колес) i_y и i_z ; на скорость – частотным преобразователем, управляющим электродвигателем M_2 ; на путь и исходное положение – по упорам системы управления.

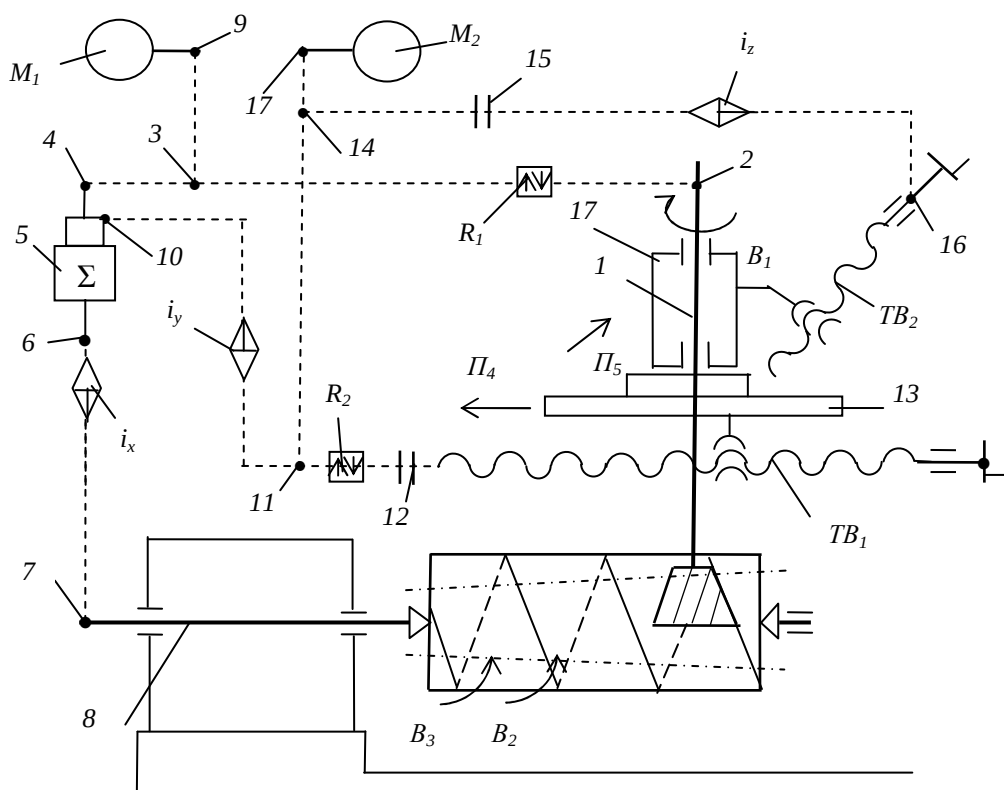


Рис. 2. Структурная схема станка с раздельным приводом формообразующих групп для нарезания червяков

Формулы настройки для i_x , i_y , i_z на траектории обоих формообразующих движений выводятся на основе следующих расчетных перемещений соответственно:

1 оборот шпинделя заготовки (B_2) $\rightarrow k/z$ оборота чашечного резца (B_1);

T мм перемещения чашечного резца (Π_4) $\rightarrow 1$ дополнительному обороту шпинделя заготовки (B_3);

L мм перемещения чашечного резца (Π_4) $\rightarrow l$ мм перемещения чашечного резца (Π_5),

где L – параметр путь (произвольное число); $l = L \cdot \operatorname{tg} \varepsilon$; ε – угол наклона образующей начальной поверхности двухшагового червяка.

Последнее значение расчетных перемещений можно также выразить через значения продольной и поперечной подачи:

S_{np} перемещение чашечного резца (Π_4) $\rightarrow S_{non}$ перемещение чашечного резца (Π_5),

где S_{np} – нормируемая продольная подача; $S_{non} = S_{np} \cdot \operatorname{tg} \varepsilon$.

При обработке двухшагового червяка станок работает следующим образом. По циклу обработки последовательно включаются электродвигатели M_1 и M_2 . Движение от электродвигателя M_1 по внешней связи группы скорости резания через звено соединения связей 3 сообщается во внутреннюю связь этой группы. В итоге шпиндель чашечного резца получает вращательное движение B_1 , а шпиндель заготовки через вход 4-выход 6 суммирующего механизма 5 – движение B_2 . Согласованные движения шпинделей воспроизводят профиль червяка. Одновременно при включенных муфтах 12 и 15 движение от электродвигателя M_2 по внешней связи группы подачи через звенья соединения связей 11 и 14 сообщается в обе цепи внутренней связи этой группы. В итоге продольный суппорт 13 и поперечный суппорт 17, несущие шпиндель червячного резца, получают движения Π_4 и Π_5 соответственно, а шпиндель заготовки через вход 10-выход 6 суммирующего механизма 5 – движение B_3 . Функциональная связь движений B_3 , Π_4 , Π_5 обеспечивает перемещение траектории движения чашечного резца по начальной конической поверхности витков червяка. При этом посредством суммирующего механизма 5 на шпинделе заготовки физически складываются движения B_2 и B_3 .

При обработке одношагового червяка посредством муфты 15 отсоединяется от привода подачи тяговый вал TB_2 поперечного суппорта 17. В итоге трехэлементарная группа подачи $\Phi_s(B_3P_4P_5)$ преобразуется в двухэлементарную $\Phi_s(B_3P_4)$. При нарезании глобоидного червяка посредством муфты 12 отсоединяется от привода подачи тяговый вал TB_1 . В итоге двухэлементарная группа подачи преобразуется в группу врезания $\Phi_s(P_5)$. Данная модификация кинематической структуры станка для обработки червяков создает предпосылки оснащения ее простейшей системой ЧПУ с использованием программируемого контроллера. При этом настройка на траекторию обоих формообразующих движений, как и в схеме с механическими связями, будет осуществляться гитарами сменных зубчатых колес. Такой вариант станка рационален в серийном производстве с установившейся номенклатурой обрабатываемых червяков. При уменьшении серийности при одновременном увеличении номенклатуры обрабатываемых деталей возрастают трудозатраты на переналадку механических органов настройки (гитар сменных зубчатых колес) на траекторию, что ведет к снижению коэффициента мобильности станка. Поэтому для достижения высокого коэффициента мобильности в единичном и мелкосерийном производстве с неустановившейся номенклатурой необходима более сложная система ЧПУ, включающая отслеживающую двухстороннюю систему синхронизации, при которой механические органы настройки на траекторию в обеих формообразующих группах заменяются электронными связями между исполнительными органами. Обязательным условием при этом является использование на каждом исполнительном органе отдельного регулируемого электродвигателя.

Выводы. Преобразование двухэлементарной группы воспроизведения винтовой линии витков традиционного одношагового червяка в способе обработки таких червяков чашечным резом, известном по библиографическому источнику, в трехэлементарную группу обеспечивает возможность обработки двухшагового червяка с винтовой линией витков на конической начальной поверхности.

При проектировании специализированного станка для обработки червяков с общим электродвигателем для формообразующих групп целесообразно использование бездифференциальной кинематической структуры. В этом случае обработка традиционного одношагового червяка с цилиндрической начальной поверхностью и двухшагового червяка с конической начальной поверхностью будет различаться только на уровне настройки формообразующих групп, обеспечивающих воспроизведение профиля и винтовой линии витков червяка, на траекторию.

При проектировании станка с индивидуальными электродвигателями в формообразующих группах необходимо использовать дифференциальную кинематическую структуру. Причем при использовании управляемых электродвигателей целесообразно оснащение станка программируемым контроллером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Червячная передача: пат. 2044194 (РФ), F16H 1/16 / А.И. Голембиевский, В.А. Петров: заявитель Полоц. гос. ун-т; опубли. 1995 // Бюл. Изобретений. – 1995. – № 26.
2. Двухшаговый червяк: пат. 2020326 (РФ), F16H 1/16 / А.И. Голембиевский, В.А. Петров: заявитель Полоц. гос. ун-т; опубли. 1994 // Бюл. Изобретений. – 1994. – № 18.
3. Голембиевский, А.И. Новая двухшаговая передача / А.И. Голембиевский, В.А. Петров // Машиностроитель. – М., 1997. – № 5. – С. 26.
4. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970.

Поступила 20.06.2014

ADVANCE TECHNICAL CINEMATIC STRUCTURE OF MACHINES WITH MECHANICAL COUPLING TREATMENT CHERVYAKOV CALYX INCISORS

A. GOLEMBIEVSKY

We consider a two-step design feature of the worm, one-step mating worm wheel. Different-stepper this worm on opposite sides of the profile provided by its location on the conical coil initial surface. The feasibility of expanding the technical capabilities of the kinematic structure of the machine for the treatment of single-step worm cup-cutter cutting through the possibility of two-step worms with conical initial surface. The conditions of the mathematical addition of the two movements in one executive agency, and on this basis the option of upgrading non-differential kinematic structure of the machine with a common one-step motor for cutting worms. Developed version of the modernization of the block diagram of the machine with separate motors for groups shaping movements. The technique of setting both structural schemes.

УДК 621.9.011:517.962.1

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОРТАЛОВ ТЯЖЕЛЫХ ПРОДОЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКОВ ТИПА «ГЕНТРИ» С ПОМОЩЬЮ МКЭ

канд. техн. наук, доц. С.С. ДОВНАР; канд. техн. наук, доц. А.М. ЯКИМОВИЧ;
канд. техн. наук, доц. И.Л. КОВАЛЕВА
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
И.И. ШУМСКИЙ
(ОАО «МЗОР», Минск)

С помощью метода конечных элементов проведено виртуальное динамическое испытание порталов двух тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри». К шпинделю прикладывалась круговая горизонтальная сила и осциллирующая вертикальная сила. Построены амплитудно-частотные характеристики, выявлены возбуждаемые резонансные моды (M_1 , M_2 , M_4). Показано подобие динамического поведения обоих станков. Выявлены эффекты антирезонанса и перекрестной деформации. Найдены три пригодных для фрезерования диапазона частот – дорезонансный, межрезонансный и зарезонансный. Показана возможность снижения веса у станков, предназначенных для высокоскоростной обработки.

Введение. Работа посвящена виртуальным динамическим испытаниям методом конечных элементов (МКЭ) [1] порталных продольно-фрезерных станков типа «Гентри» производства ОАО «МЗОР» [2]. МКЭ-моделирование направлено на выявление динамических особенностей станков. В современном производстве динамическое поведение станков признается более существенным, чем статическая жесткость [3].

Линейку станков «Гентри» от МЗОР в работе представляют две машины:

- классический станок MC620 с «тяжелой», статически довольно жесткой [4] несущей системой, выпускаемый в вариантах на протяжении ряда лет;
- недавно разработанный станок MC21Г25 примерно с такими же рабочими габаритами, но с «облегченной», немного субтильной несущей системой портала.

Модальный анализ станка MC620, т.е. поиск его резонансных (собственных) мод, был проведен ранее [5] с помощью МКЭ. Обнаруженные моды (сочетания резонансных частот и форм колебаний), оказались очень стабильными при вариациях параметров станка. Поэтому можно предполагать, что все порталные станки МЗОР имеют общие динамические особенности.

В данной работе на базе модального МКЭ-анализа станков [5] производится их гармонический анализ. К шпинделю прикладываются синусоидальные компоненты силы резания на ряде частот. Отклик станка в виде перемещений шпинделя вычисляется с помощью МКЭ. По результатам строятся и анализируются АЧХ (амплитудно-частотные характеристики) [6].

Геометрические модели станков. Геометрическая модель несущей системы станка MC620 представлена на рисунке 1, а.

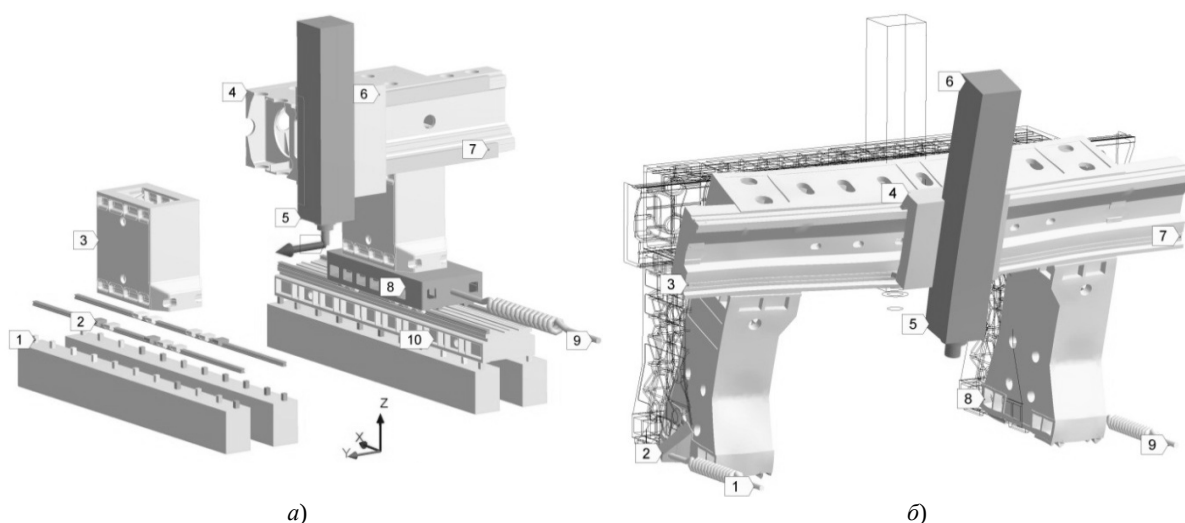


Рис. 1. Геометрические модели станков MC620 (а) и MC21Г25 (б):

а – часть деталей не показана; б – в станке круговой силой возбуждена резонансная мода M_1 «Клевки портала» ($f_1 = 17,3$ Гц)

На бетонных фундаментных блоках находятся башмаки 1, которые несут станины 10. На станинах вдоль продольной оси X размещены рельсы с опорами качения 2 (опоры X). Эти опоры представлены стилизованно, как податливые объекты, способные без трения скользить по рельсам. Зубчато-реечный привод по оси X заменен пружиной 9 для каждой направляющей (далее это пружины X). На направляющих X находятся сани 10 с колоннами 3. На две колонны базируется траверса 4. Вместе сани, колонны и траверса образуют портал. Направляющие 7 установлены вдоль Y (поперечная ось) и несут каретку 6. В данной работе каретка всегда предполагается зажатой посередине направляющих Y . Ползун 5, направленный по вертикальной оси Z , также зажат в каретке. Возле маркера 5 на ползуне выполнен образ конца шпинделя. Однако шпиндельный узел, ползун и каретка в данной работе не рассматриваются. Они считаются монолитным жестким телом и подобны эксцентричному грузу на траверсе. Моделирование направлено на выявление динамических деформаций именно портала станка.

«Облегченный» станок типа «Гентри» MC21Г25 представлен на рисунке 1, б в состоянии возбуждения моды М2. Главным отличием этой модели от MC620 является включение саней в состав колонн 2-3 и 8-7. Портал образует параллелограмм 2-3-7-8. Продольно вдоль оси X его удерживают пружины 1 и 9. Под колоннами находятся опоры X . Нижележащие станины считаются достаточно жесткими и не рассматриваются. Размеры порталных деталей обоих станков приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характерные размеры порталов «Гентри» для моделирования

Станок	MC620	MC21Г25
Расстояние между колоннами, мм	3200	3520
Просвет портала, мм	1900	2280
Сечение траверсы, мм	1050 × 1200	1025 × 960
Сечение колонн, мм	1285 × 840	1020 × 700
Вылет ползуна при моделировании, мм	200	500
Сечение ползуна, мм	550 × 560	500 × 500

Конструкция на рисунке 1, а является тяжеловесной и сравнительно жесткой статически. На рисунке 1, б, наоборот, представлена максимально податливая в статике несущая система. Параллельное рассмотрение обоих станков позволяет оценить динамику всей линейки порталных машин МЗОР.

Применяемые материалы и упруго-массовые характеристики деталей порталов. Основным материалом для корпусных деталей портала является серый чугун СЧ (табл. 2). Для направляющих использована сталь, а для фундаментных блоков – бетон. Присутствуют также два модельных материала Мат1 и Мат2 для каретки и ползуна соответственно. У этих материалов, созданных на базе стали, можно виртуально управлять модулем упругости E и плотностью ρ .

Таблица 2

Несущие детали порталов и их упругие свойства

Деталь	Материал	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Плотность ρ , кг/м ³	Масса m , кг
Траверса	СЧ	110/(110...160)	0,28	7200	9172/6447
Каретка	Мат1	400/200	0,3	1509/6340	1400/1481
Ползун	Мат2	2000/200	0,3	3467/6340	3000/4914
Колонна	СЧ	110/(110...160)	0,28	7200	1957/3233
Сани	СЧ	110/–	0,28	7200	2352/–
Суппорт в сборе, кг	Мат 1,2	4400 / 6500			
Портал в сборе, кг	СЧ, сталь	22747 / 19915			
Станина	СЧ	110	0,28	7200	3032
Фундаментный блок (4 шт.)	Бетон	30/–	0,18/–	2300/–	2760/–
Масса над фундаментом, кг	–	29412 / 19915			

Таблица 2 описывает массовые и упругие свойства деталей портала. В каждой ячейке перед чертой «/» стоит число для станка MC620, после черты – для MC21Г25. Пары чисел в скобках указывают диапазон варьирования параметра. Например, это может быть модуль упругости, чувствительный к мар-

ке чугуна. Каретка и ползун со шпиндельным узлом вместе названы суппортом в сборе. К ним применены модельные материалы так, чтобы обеспечивались: нужная масса суппорта (включая массу навесного оборудования); высокая жесткость (суппорт должен колебаться почти как жесткое целое).

Обратим внимание, что массы порталов в сборе у обоих станков почти одинаковы. Станок MC21Г25 сконструирован более узким в сечениях, но имеет большую ширину портала и более тяжелый суппорт.

В таблице 3 описаны свойства опор качения X , фундаментных башмаков и пружин X . Пружины являются математическими объектами, создаваемыми средствами МКЭ. Один конец пружины был жестко закреплен, второй – связывался с саями или колонной. Пружины действовали строго в направлении X и характеризовались только жесткостью (см. табл. 3). Жесткость пружин соответствовала данным из каталога для безззорных зубчато-реечных приводов REDEX.

Таблица 3

Соединяющие упругие детали и их свойства

Деталь	Модуль упругости, ГПа	Ось действия нагрузки	Жесткость, Н/мм
Опора качения (вдоль X)	8/(2...8)	Y, Z	4000/(1000...4000)
Башмак (фундаментный)	83,3/–	Z	3000/–
Пружина – привод X	–	X	400/(200...800)

Пружины и башмаки являлись монолитными трехмерными телами сравнительно простой геометрии. Считалось, что они сделаны из идеального упругого модельного материала. Модуль упругости материала (см. табл. 3) подбирался в ходе предварительных тестовых расчетов так, чтобы получить желаемую жесткость объектов. Жесткость назначалась исходя из каталогов.

Для опор качения модуль упругости был в десятки раз ниже, чем у стали. В данной работе тела качения внутри опор не моделировались. Через понижение модуля упругости учитывалась присущая телам качения невысокая контактная жесткость.

При моделировании в геометрию и параметры МКЭ-моделей станков MC620 и MC21Г25 умышленно вносились некоторые различия. Целью было максимальное отдаление несущих систем друг от друга, чтобы были лучше видны общие и индивидуальные черты.

Результаты предварительного модального МКЭ-анализа. В таблице 4 для обоих станков представлено по шесть первых резонансных мод $M1...M6$. Для MC620 они были обнаружены ранее [5], а для MC21Г25 найдены в данной работе. Это так называемые общестаночные моды, в которых участвует весь портал станка. Ранее было установлено, что частоты этих мод $f_1...f_6$ весьма устойчивы к вариациям параметров несущей системы станка.

Таблица 4

Общестаночные резонансные моды порталных станков типа «Гентри»

Резонансная мода	Частота для MC620, Гц	Частота для MC21Г25, Гц	Характер модального движения
M1 «Клевки портала»	19,9	17,3 (14,0...24,0)	Наклоны портала вдоль оси X
M2 «Параллелограмм»	22,9	24,3 (19,5...27,1)	Портал «складывается» вбок в параллелограмм
M3 «Ходьба портала»	32, 2	38,6 (30,3...45,6)	Противофазные движения левых и правых колонн и саней вдоль оси X
M4 «Клевки траверсы»	41,9	33,0 (29,5...40,3)	Клевки ползуна и закручивание траверсы
M5 «Выгибание подковой»	69,3	62,5 (54,0...71,9)	Вертикальные колебания суппорта и изгиб траверсы
M6a «Двойной перекося»	77,7	–	Выход портала из плоскости YZ с образованием сразу 4-х пучностей
M6b «Влияние суппорта»	–	66,5 (59,6...78,1)	Возвратно-вращательное колебание каретки и ползуна в плоскости YZ

Выявленные шесть общестаночных мод исчерпываются в частотном диапазоне от 0 до (80...100 Гц). На более высоких частотах находятся многоволновые резонансы и резонансы отдельных узлов, например, шпинделя в сборе. Эти варианты возбуждения в настоящей работе не рассматриваются. Моды у обоих станков совпадают по форме колебаний. Модальные частоты различаются в паре станков для каждой моды ненамного, на 1...2 дБ (один дБ соответствует изменению параметра в $\sqrt[20]{10} \cong 1,12$ раз). Каждая мода – это потенциальное резонансное возбуждение внешней силой. Совпадение набора мод указывает,

что динамика обоих станков будет подобна. Исключением являлись шестые по счету моды. У рассматриваемых станков они имеют близкие частоты, но разные формы колебательных движений. Поэтому моды обозначены в таблице 4 как М6а и М6б для станков МС620 и МС21Г25 соответственно.

Дополнительно для МС21Г25 в рамках модального анализа было проведено варьирование ряда его жесткостных параметров (модулей упругости чугуна, жесткостей опор X и пружин X – диапазоны величин в скобках в таблицах 2 и 3). Модальные частоты откликались на вариации (числа в скобках в 3-м столбце таблицы 4). Однако отклики были слабыми. Частоты изменялись лишь на несколько децибелов при варьировании жесткости пружин и опор в 4 раза, а модуля упругости чугуна – в 1,5 раза.

Итак, резонансные картины обоих станков весьма близки и устойчивы. Исходя из этого, виртуальные испытания станков производились в одном и том же диапазоне частот $1 < f_u < 100$ Гц, называемом далее диапазоном интереса. В нижней части диапазона ожидается почти статическое поведение станков. Верхняя часть диапазона должна быть уже зарезонансной для всех найденных общестаночных мод.

Граничные условия и постановка гармонического анализа. Станки были закреплены снизу. Для МС620 жестко фиксировались нижние стороны фундаментных плит. Станок МС21Г25 перемещался по невидимым жестким направляющим вдоль X . Оба портала удерживались пружинами X . Концы пружин, не связанные с порталами, были зафиксированы.

В гармоническом МКЭ-анализе объект нагружают только периодическими силами или перемещениями. В каждом конкретном расчете все нагрузки должны иметь одну частоту, но могут быть сдвинуты по фазе. Поэтому постоянная сила тяжести в моделировании не участвовала. Нагружение происходило только силой резания, приложенной к шпинделю на ползуне. Было смоделировано два варианта действия силы: круговая сила, вращающаяся в плоскости XY и направленная всегда радиально от шпинделя; вертикальная сила, синусоидально колеблющаяся вверх – вниз вдоль оси шпинделя Z .

На рисунке 1, а к шпинделю (ниже маркера 5) приложен вектор пробной круговой силы $\overline{F^{kp}}$. Этот вектор имеет величину 100 Н и вращается в горизонтальной плоскости. Частота вращения соответствует частоте испытания f_u . Круговая сила имитирует силу резания на вращающемся однозубом инструменте. Круговая сила представима как две гармонические силы, действующие продольно $F_x^{kp} = 100 \cdot \sin 2\pi f_u$ и поперечно $F_y^{kp} = 100 \cdot \sin(2\pi f_u - \pi/2)$. Таким образом, круговая сила испытывает станок одновременно по осям X и Y .

Вертикальная гармоническая сила также имела величину 100 Н и описывалась уравнением $F_z^{вепм} = 100 \cdot \sin 2\pi f_u$. Сила моделировала вертикальную (осевую) пульсацию реального инструмента в шпинделе. Величина круговой и вертикальной сил (100 Н) не принципиальна. Гармоническая задача является линейной и допускает масштабирование вычисляемых перемещений пропорционально фактической силе.

Во всех МКЭ-расчетах прикладывалась только одна сила – или круговая, или вертикальная. Демпфирование в станке было назначено равным 2 %. Это невысокий уровень. Так должны лучше выявляться резонансные возбуждения в портале.

Для каждой частоты испытания f_u выполнялось своё МКЭ-решение. Частота изменялась в диапазоне от 0 до 100 Гц обычно с шагом 5 Гц. Шаг уменьшался возле модальных частот, чтобы лучше выявить резонансные пики.

Цель гармонического анализа – увидеть, какие резонансные моды возбуждаются при конкретном нагружении и насколько сильно это происходит. Часть мод обычно остается пассивными при действии гармонических сил в данных местах и в данных направлениях (даже если частота колебания силы совпадает с модальной частотой). Резонансные моды портала, которые удастся возбудить круговой и вертикальной тестовыми силами, будем называть далее возбуждаемыми модами.

МКЭ-модели станков. Сетки конечных элементов состояли из тетраэдрических и гексаэдрических элементов. Все элементы обладали квадратичной аппроксимацией перемещений и хорошей, стандартной точностью и устойчивостью в решении. Максимальный размер сетки составил 354 тысячи элементов и 688 тысяч узлов. Каждый узел имел три степени свободы.

Конечно-элементная сетка станка состояла из сеток отдельных деталей. Эти сетки соединялись друг с другом контактными конечными элементами. Обычно элементам с двух сторон контакта назначался статус «bonded», что вело к виртуальному сцеплению их друг с другом. Контактная пара работала подобно идеальному клею и заменяла реальные сопряжения в станке. По направляющим X контактные конечные элементы имели статус «no separation». Это разрешало свободное скольжение без отрыва. Направляющие Y и Z существовали, но были заблокированы («bonded»). Силы трения прямо не моделировались, так как их нелинейность не может быть прямо отображена в линейной гармонической задаче.

Гармонические силы и возбуждаемые резонансные моды. В таблице 5 сведена информация о пиковых амплитудах перемещений $\delta_{x,y,z}$ для всех вариантов возбуждения. Для удобного восприятия таб-

лицы перемещения менее 1 мкм не заносились. Все поставленные числа соответствуют каким-либо резонансам. Для каждого резонанса есть информация об эффективности возбуждения его как круговой, так и вертикальной силой. Отметка «dr» (driving – приводящая) возле символа оси указывает, что вдоль данной оси в данном испытании действует тестовая сила. Отметка «ct» (возле некоторых перемещений) обращает внимание, что по данной оси привода силой не было. Следовательно, имеет место перекрестная деформация (crosstalk) [3].

Таблица 5

Амплитуды резонансных перемещений на конце шпинделя при разных вариантах возбуждения

Станок	Ориентация возбуждающей силы	Амплитуды перемещений по осям, мкм	Резонансная мода					
			M1	M2	M3	M4	M5	M6
MC620	круговая	δ_x (dr)	2,45			3,65		
		δ_y (dr)	1,33	7,60				
		δ_z	2,46 ct			3,55 ct		
	вертикальная	δ_x	2,10 ct			4,20 ct		
		δ_y						
		δ_z (dr)	2,0			4,15		
MC21Г25	круговая	δ_x (dr)	1,44	1,22		12,77		
		δ_y (dr)		7,68				2,83
		δ_z	1,72 ct			5,34 ct		
	вертикальная	δ_x	1,25 ct			5,94 ct		
		δ_y						
		δ_z (dr)	2,21			2,50	1,18	
Оценка возбуждаемости моды		довольно сильно	сильно	нет	сильно	слабо	слабо	

Как круговая, так и вертикальная силы уверенно возбуждают у обоих станков моду M1 «Клевки портала». Рисунок 1, б получен для MC21Г25 при действии круговой силы. Однако точно такая же картина возникает при гармоническом вертикальном возбуждении. При резонансе по моде M1 портал покачивается (клюёт) в продольной вертикальной плоскости XZ. Ось качания портала параллельна Y и проходит примерно через упор возле маркера 2. Колонны 2 и 8, траверса 3 – 7, каретка 4, ползун 5 – 6 почти не деформируются. Упругие деформации происходят по низу колонн и в опорах X. Пружины 1 и 9 допускают небольшую осцилляцию портала вдоль X. Ось шпиндельного узла 5 все время меняет ориентацию.

Важно отметить, что шпиндель перемещается по X и Z одновременно. Поскольку вдоль Z сила не прилагалась, то присутствует перекрестная деформация (crosstalk). Можно говорить о коэффициенте упругой связи $CT_{XZ}^{M1-круг}$ между силой по X и перемещением по Z на частоте моды M1. Вертикальное возбуждение моды M1 для станка MC620 показано на рисунке 2, а. Картина очень близка к рисунку 1, б. Портал покачивается относительно точки 0. Упругие деформации сосредоточены в опорах X, санях и станине (область 2-0-4). Пружины 3 осциллируют в продольном направлении. Портал с суппортом 6 и ползуном 7–8 ведет себя примерно как жесткое целое. Хорошо видно, что шпиндель (возле маркера 7) перемещается и продольно, и вертикально. Подтверждается перекрестная связь. По сравнению с рисунком 1, б на рисунке 2, а всё наоборот: сила по Z вызывает перемещение по X. Поскольку задача линейная, то существует коэффициент связи $CT_{ZX}^{M1-верт}$.

Забегая вперед, скажем, что наличие перекрестной деформации подтверждается тем, что на всех АЧХ (рис. 3–6) прохождение резонанса M1 «чувствуют» как кривые X, так и кривые Z.

Мода M2 «Складывание портала» (рис. 2, в) возбуждается только круговой силой. Наибольшие перемещения у обоих станков наблюдаются в поперечном направлении и достигают $\delta_y = 7,68$ мкм. Движение соответствует кинематике параллелограмма 2-3-7-8. Колонны покачиваются в плоскости YZ, траверса возвратно-поступательно движется вдоль Y. Корпусные детали в целом деформируются слабо. Однако на их сопряжениях, в углах параллелограмма формируются упругие шарниры. Два размытых, распределенных шарнира (3 и 7) возникают на стыках колонн с траверсой. Еще два шарнира (возле маркеров 2 и 8) создаются из-за податливости опор качения X и прилегающих к ним стенок колонн. Ползун (5-6) с кареткой 4 перемещается плоскопараллельно на траверсе 3-7. Пружины X (1 и 9) не участвуют в колебаниях.

Общая причина резонанса – угловая податливость portalного параллелограмма. Дополнительно МКЭ-расчетами было проверено, что мода М2 возбуждается осцилляцией тестовой силы только вдоль Y . Наличие именно круговой силы не обязательно.

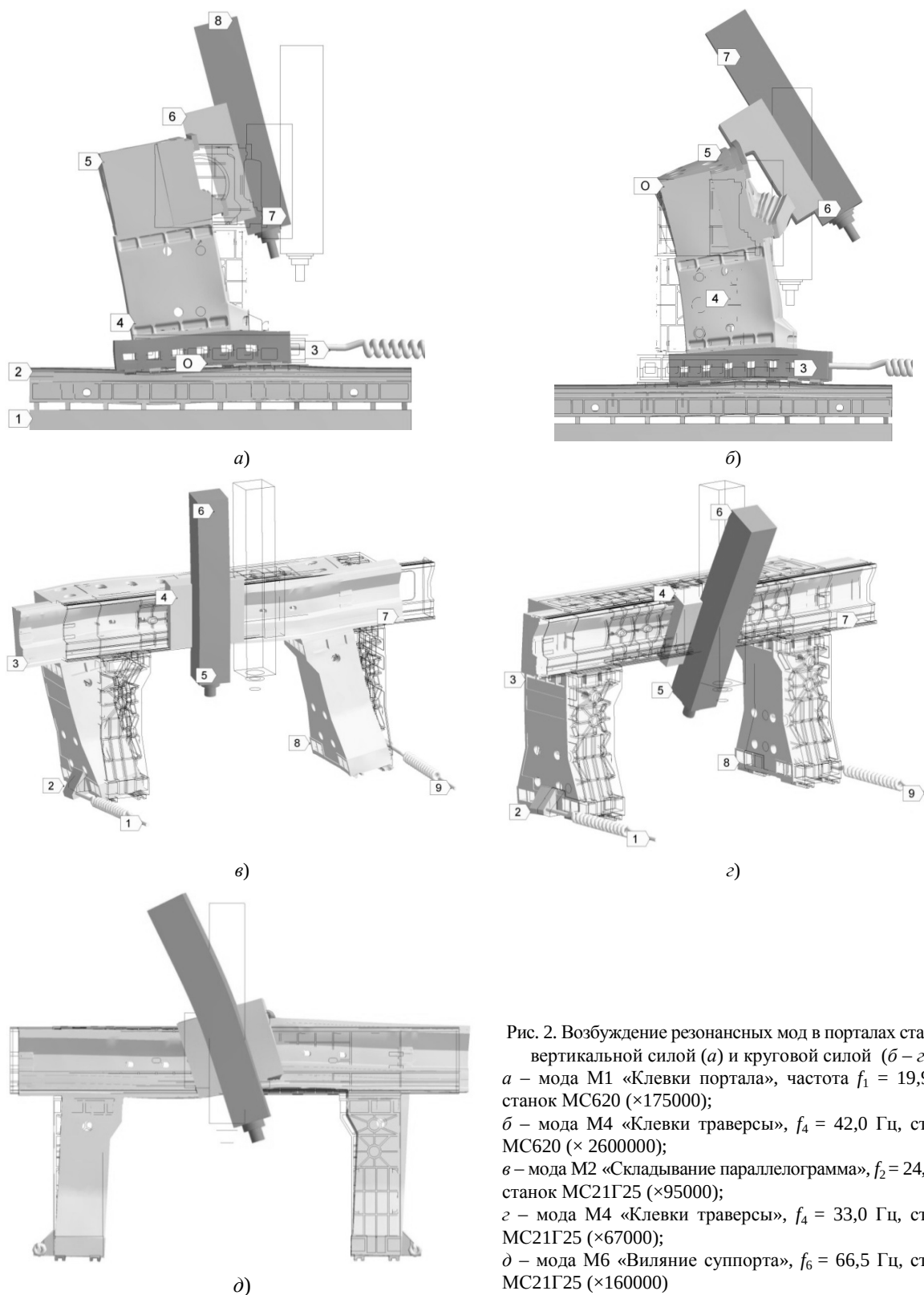


Рис. 2. Возбуждение резонансных мод в порталах станков вертикальной силой (а) и круговой силой (б – г):
 а – мода М1 «Клевки портала», частота $f_1 = 19,9$ Гц, станок МС620 ($\times 175000$);
 б – мода М4 «Клевки траверсы», $f_4 = 42,0$ Гц, станок МС620 ($\times 2600000$);
 в – мода М2 «Складывание параллелограмма», $f_2 = 24,3$ Гц, станок МС21Г25 ($\times 95000$);
 г – мода М4 «Клевки траверсы», $f_4 = 33,0$ Гц, станок МС21Г25 ($\times 67000$);
 д – мода М6 «Влияние суппорта», $f_6 = 66,5$ Гц, станок МС21Г25 ($\times 160000$)

Мода М3 «Ходьба портала» практически не возбуждается в среднем положении суппорта. Дело в том, что в собственной форме моды все перемещения сосредоточены на краях портала (рис. 3 [5]), а сам

шпиндель неподвижен. В отсутствие модального перемещения в месте приложения вынуждающей силы накачать энергию невозможно. Поэтому резонансные колебания по МЗ не возбуждаются.

Резонансные колебания по моде М4 «Клевки траверсы» показаны на рисунке 2, б для станка МС620 и на рисунке 2, г для станка МС21Г25. Максимальное перемещение ($\delta_x = 12,77$ мкм) в резонансе достигнуто круговой силой на станке МС21Г25. Для МС620 раскачка слабее – только $\delta_x = 3,65$ мкм.

Мода М4 одинаково эффективно возбуждается как круговой силой, так и вертикальной. В обоих случаях для МС620 наблюдается почти точное равенство перемещений по Х и Z (см. табл. 5). Поэтому коэффициенты перекрестной связи $CT_{XZ}^{M4-круг} \cong CT_{ZX}^{M4-верт} \cong 1$. Для МС21Г25 δ_x и δ_z соотносятся как 2:1. Итак, для моды М4 выражена перекрестная связь между силой и перемещениями по Х и Z (crosstalk).

Колебания портала по М4 (см. рис. 2, б) лучше всего сопоставлять с уже обсужденным резонансом М1 (см. рис. 2, а). Колебания по моде М4 заключаются в кручении траверсы (особенно заметно возле маркера 5). Ползун 6-7 и каретка совершают возвратно-вращательное движение (клевки) вокруг высоко поднятого центра О (сравним положения 0 на рисунке 2, а и 2, б). Шпиндельный узел (под маркером б), поворачиваясь относительно О, вынужден смещаться и вверх, и вправо. Так возникает перекрестная деформация – сила действует вдоль оси Х, а перемещения происходят и по Х, и по Z.

Дополнительно, как видно из рисунка 2, б, колонны 4, особенно сани 3, возвратно-поступательно движутся по направляющим Х, балансируя клевки. Станины и фундамент остаются практически неподвижными.

Ту же, но более яркую картину резонанса М4 можно увидеть на рисунке 2, г для «облегченного» портала МС21Г25. Колонны 2 и 8, а также концы траверсы 3 и 7 движутся плоскопараллельно вдоль продольной оси Х. Ползун 5-6 с кареткой 4 в основном раскачивается в плоскости ХZ. Это допускает траверса, испытывающая крутильные колебания. Кручение груза на стержне (суппорта в сборе на траверсе) является главным движением резонанса М4 «Клевки траверсы». Ввиду эксцентричного положения конца шпинделя относительно оси инерции траверсы возбуждать крутильные колебания можно как круговой силой $\overline{F^{кр}}$, так и вертикальной $\overline{F^{верт}}$.

Моды М5 и М6 оказались слабо возбуждаемыми. Для станка МС620 они почти незаметны. Для МС21Г25 вертикальная сила возбуждает только моду М5, а круговая – только М6. Перекрестные связи между силами и перемещениями (разных направлений) ярко не выражены.

На рисунке 2, д показаны колебания станка на резонансе $f_6 = 66,5$ Гц. Соответствующую моду М6 (точнее, М6б «Вилание суппорта») лишь с натяжкой можно назвать общестаночной. Портал немного качается в плоскости YZ по типу моды М2 «Складывание параллелограмма». Однако главным является возвратно-вращательное движение суппорта в сборе. Каретка, как на рессорах, покручивается на своих опорах Y (они зажаты и неподвижны). На частоту покручиваний (виланий) влияет инерционность длинного тяжелого ползуна и его вылет.

В сущности, рисунок 2, д иллюстрирует локальную моду, близкую к классическому вращению груза на пружине кручения. Данный резонанс существенен для точности обработки, так как отклоняет ось шпинделя от вертикали. Возбуждение локальной моды М6 показывает, что на таких частотах общестаночные моды уже закончились.

Анализ АЧХ станков. Обсудим сначала серию виртуальных испытаний станка МС620 круговой силой $\overline{F^{кр}}$, приложенной к концу шпинделя радиально. Испытания различались только частотой. Под действием силы шпиндель двигался по пространственной эллиптической траектории. Координаты его конца менялись синусоидально по Х, Y, Z со сдвигами по фазе. Амплитуды синусоид δ_x , δ_z , δ_y были выбраны выходными сигналами. По ним построены три АЧХ, представленные на рисунке 3.

Обнаружено, что у станка МС620 под действием круговой силы возбуждаются только три резонансные пика, строго соответствующих модам М1, М2 и М4. Не найдено возбуждений, в которых комбинируются две или более собственных моды. Пики резонансов отмечены на рисунке 3 длинными маркерами с указанием моды и частоты. Моды МЗ, М5 и М6 для возбуждения круговой силой остаются неактивными. Они не создают резонансных пиков и формально указаны на АЧХ короткими маркерами.

Итак, ожидается резонансное возбуждение только трех из шести общестаночных собственных мод колебаний. Соответственно, можно говорить о возбуждаемых и невозбуждаемых модах (см. табл. 5). Будем называть резонансным диапазоном интервал частот, занятый общестаночными резонансными пиками. Для рисунка 3 это диапазон М1 – М2 – М4, идущий от 20 до 42 Гц (считая по вершинам пиков) или от 17 до 45 Гц (по границам пиков).

В левой части диапазона интереса (0...100 Гц) находится дорезонансный диапазон (0...17 Гц). Здесь динамические эффекты еще не выявились. Ситуация близка к статической. В правой части нахо-

дится резонансный диапазон (45...100 Гц). Тут возбуждающая сила осциллирует слишком часто по сравнению с инерционностью портала. Колебательные движения гасятся.

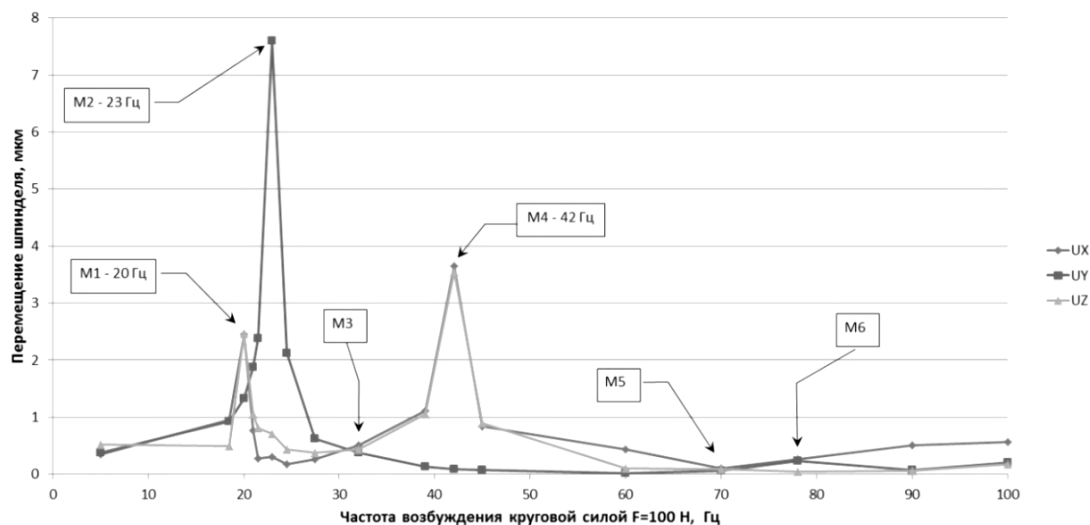


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика для станка MC620 при возбуждении круговой силой $\overline{F^{kp}}$, в плоскости XY (длинный маркер, например, «M2 – 23 Гц» указывает на возбужденную моду, короткий маркер, например, «M5» – невозбужденную моду)

На рисунке 4 показана АЧХ возбуждения станка MC620 вертикальной силой на шпинделе. Видно, что возникает только два резонансных пика. Они соответствуют клевкам портала (M1) и клевкам траверсы (M4). Остальные моды остаются неактивными. Это касается и M2, которой соответствуют поперечные колебания. Между вертикальной вынуждающей силой и модой M2 нет перекрестной связи.

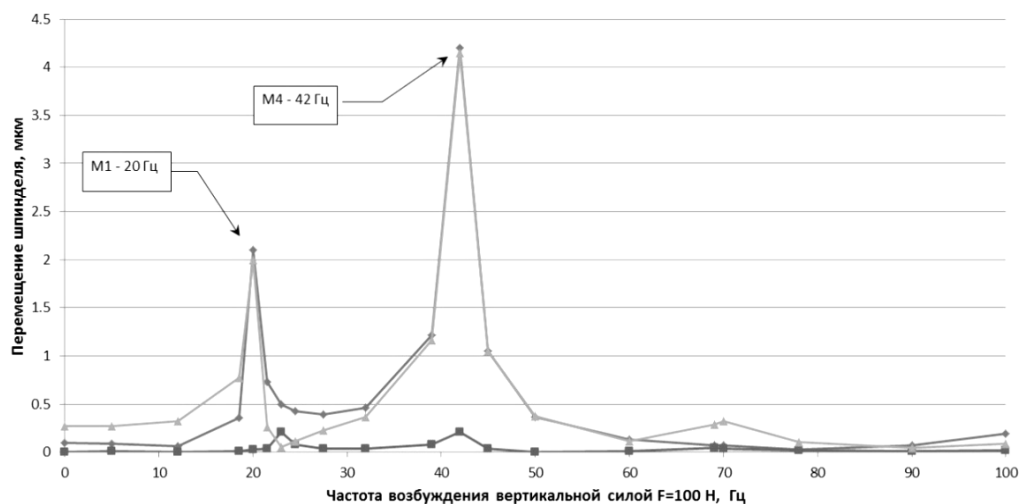


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика для станка MC620 при возбуждении вертикальной гармонической силой

Сопоставим АЧХ на рисунках 3 и 4. С точки зрения практики ясно, что на данном станке не следует работать в резонансном диапазоне 17...45 Гц. Любые компоненты силы резания вызывают здесь раскочку портала. Колебания силы резания при фрезеровании происходят прежде всего на частоте

$$f_{fp} = (n_{fp} \cdot z) / 60 \text{ Гц},$$

где n_{fp} – частота вращения фрезы, мин^{-1} ; z – число зубьев фрезы.

Следовательно, инструмент и скорость резания надо подбирать так, чтобы (статический, дорезонансный диапазон) или (зарезонансный диапазон) при наличии особых обстоятельств можно работать на

частоте невозбуждаемой моды М3. Этот диапазон назовем межрезонансным. Его недостатком является узость по частоте.

Рассмотрим поведение «облегченного» станка МС21Г25. Его АЧХ при возбуждении круговой силой приведена на рисунке 5. Обнаружено четыре резонансных пика, соответствующих модам М1, М2, М4 и М6. Мода М6 не проявлялась у «тяжелого» портала. В остальном круговые АЧХ станков МС620 и МС21Г25 (рис. 3 и рис. 5) принципиально совпадают.

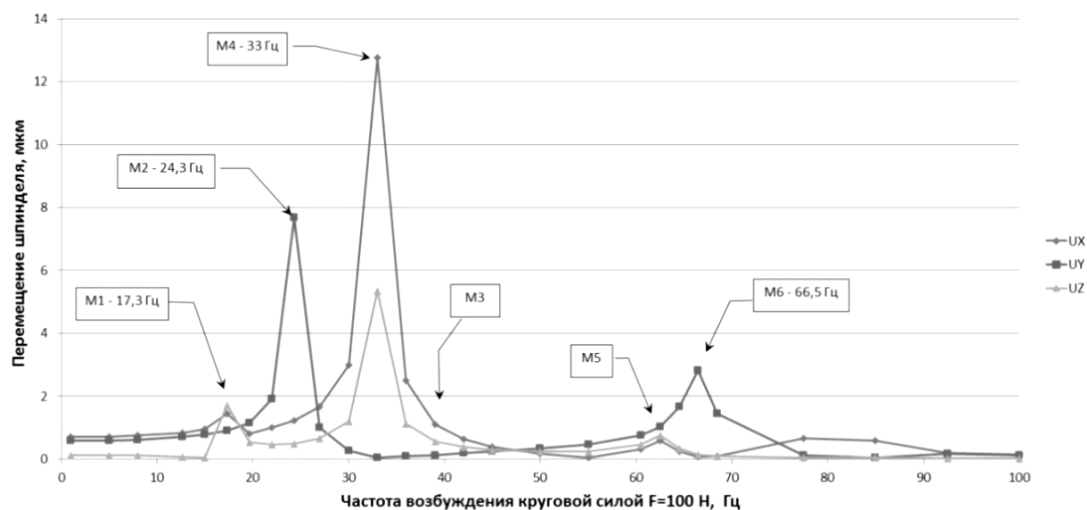


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика для станка МС21Г25 при возбуждении круговой гармонической силой в плоскости ХУ

Амплитудно-частотная характеристика «запрещает» работать в диапазоне частот 20...40 Гц, где лежат самые мощные резонансные пики М2 и М4. Между ними нет существенного просвета. Главный резонансный диапазон М1 – М2 – М4 тянется от 15 до 40 Гц. Дополнительно, резонанс по М6 делает нежелательным для работы интервал от 60 до 72 Гц. При этом пики М1 и М6 не очень высоки. Возможно, есть средства их демпфировать.

Однако лучше обходить резонансные диапазоны и работать на трех участках: 0...15 Гц, 40...60 Гц, от 72 Гц и выше. Самыми мощными на круговой АЧХ (см. рис. 5) являются пики М2 и М4.

Графики АЧХ для вертикального возбуждения приведены на рисунке 6. Присутствуют моды М4, М1 и М6 (перечислены по амплитудам перемещений в убывающем порядке). На всех частотах колебания идут в плоскости ХZ. График поперечного перемещения δ_y на рисунке 6 практически совпадает с абсциссой. При круговом возбуждении (см. рис. 5) все три графика были «активны».

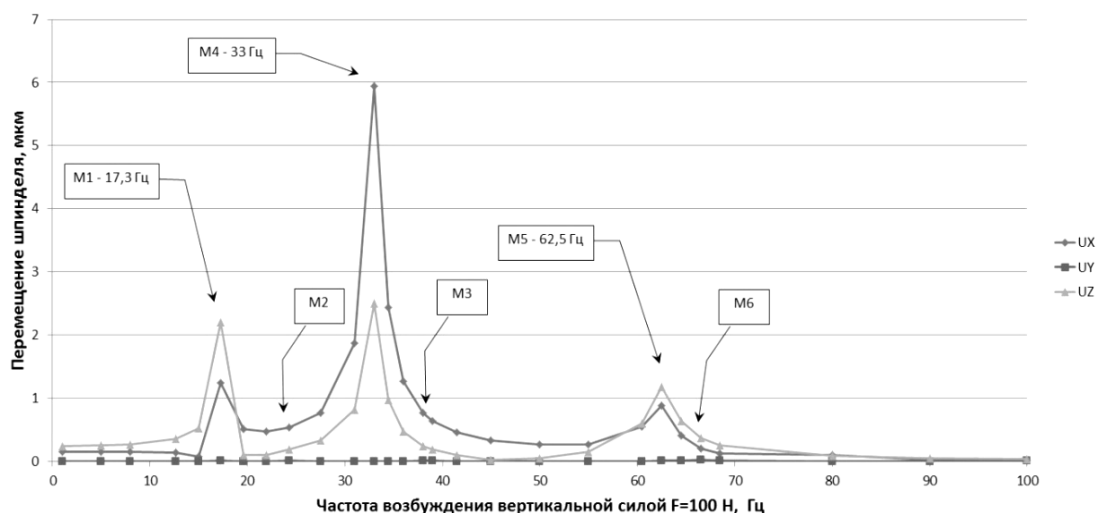


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика для станка МС21Г25 при возбуждении вертикальной гармонической силой

В целом АЧХ на рисунках 5 и 6 согласуются друг с другом. Сделанные выше выводы о резонансных и рабочих диапазонах остаются неизменными.

Динамическая жесткость станков типа «Гентри». По результатам выполненного гармонического анализа вычислены динамические жесткости станков MC620 (табл. 6) и MC21Г25 (табл. 7). Динамическая жесткость вычислялась для конца шпинделя как отношение пробной силы (100 Н) к перемещению шпинделя в данном направлении (или X , или Y , или Z). Перемещения брались на краях диапазона интереса (1 и 100 Гц) и на резонансных пиках М1, М2, М4. Жесткость шпинделя и его подшипников считалась достаточно высокой и не моделировалась. Шпиндельный узел был монолитом. Решения для частот 1...5 Гц практически являются статическими решениями. С этой характеристикой они обсуждаются ниже.

Как для статической $j^{\text{стат}}$, так и для динамической жесткости $j^{\text{дин}}$ минимально необходимым для нормальной обработки считаем уровень $j_{\text{lim}} = 20 \text{ Н/мкм}$ [3]. При падении жесткости ниже 10 Н/мкм становятся весьма вероятными регенеративные автоколебания в процессе резания (regenerative chatter). Для жесткости они практически неизбежны.

Таблица 6

Динамическая жесткость станка MC620 на резонансных пиках

Частота нагружения	Сила на шпинделе		
	$F_X = 100 \text{ Н}$	$F_Y = 100 \text{ Н}$	$F_Z = 100 \text{ Н}$
$f_{\text{min}} = 1 \text{ Гц}$ (статика)	278	263	370
Резонанс М1 ($f_1 = 19,9 \text{ Гц}$)	40,8	75	50
Резонанс М2 ($f_2 = 22,9 \text{ Гц}$)	323	13,2	2000
Резонанс М4 ($f_4 = 41,9 \text{ Гц}$)	27,4	1110	24,1
$f_{\text{max}} = 100 \text{ Гц}$	175	476	1110

Таблица 7

Динамическая жесткость станка MC21Г25 на резонансных пиках

Частота нагружения	Сила на шпинделе		
	$F_X = 100 \text{ Н}$	$F_Y = 100 \text{ Н}$	$F_Z = 100 \text{ Н}$
$f_{\text{min}} \cong 1 \text{ Гц}$ (статика)	141	172	400
Резонанс М1 ($f_1 = 17,3 \text{ Гц}$)	69	110	45
Резонанс М2 ($f_2 = 24,3 \text{ Гц}$)	82	13,0	526
Резонанс М4 ($f_4 = 33,0 \text{ Гц}$)	7,8	2000	40
$f_{\text{max}} = 100 \text{ Гц}$	667	833	2500

Анализ таблиц показывает, что ситуации со статической и динамической жесткостью для обоих станков очень близки. Есть серьезные падения динамической жесткости по отношению к статической (выделено шрифтом). Отметим, что высота резонансных пиков на АЧХ обратно пропорциональна динамической жесткости. Повышение демпфирования в станках должно сгладить резонансные пики (именно пики, а не всю АЧХ). Это поднимет динамическую жесткость, но только на резонансных частотах.

В данной работе на всех АЧХ наблюдаются довольно узкие пики, поскольку принят невысокий (2 %) коэффициент демпфирования. При увеличении коэффициента демпфирования пики снижаются, но расширяются. Это ведет к расширению нежелательных резонансных участков.

На рисунке 7 представлена обобщенная оценка динамической жесткости станка MC21Г25 во всем диапазоне интереса. Сплошная линия j_{max} отражает максимальную жесткость в горизонтальной плоскости XY на данной частоте испытания независимо от направления. Штриховая линия j_{min} показывает минимальную из текущих жесткостей по X или по Y . Провалы минимальной жесткости свидетельствуют о резонансах (P). Они соответствуют модальным пикам на АЧХ, представленным на рисунке 5.

Подъемы j_{max} обращают внимание на то, что станок становится более жестким в определенном направлении на данной частоте. Это объясняет известный эффект антирезонанса (AP) [3]. В несущей системе станка должна существовать упругомассовая подсистема, которая локально резонирует. Её колебания автоматически подстраиваются в противофазе к внешней гармонической силе и могут почти полностью блокировать её действие. Внешне это проявится как «сверхжесткость» (например, шпиндельного узла) в данном направлении на данной частоте.

Резонанс в одном направлении может сопровождаться антирезонансом в противоположном. Так происходит для станка MC21Г25 на частоте 33 Гц при возбуждении круговой силой моды М4 «Клевки портала» (табл. 8). Круговая сила эффективно раскачивает на резонансе портал в продольном направлении X. В поперечном направлении Y, наоборот, портал кажется на порядок более жестким, чем в статике. В этом и проявляется антирезонанс. Дополнительно таблица 8 указывает на перекрестную связь (crosstalk). Резонансная продольная раскачка ведет к раскачке вертикальной, по оси Z.

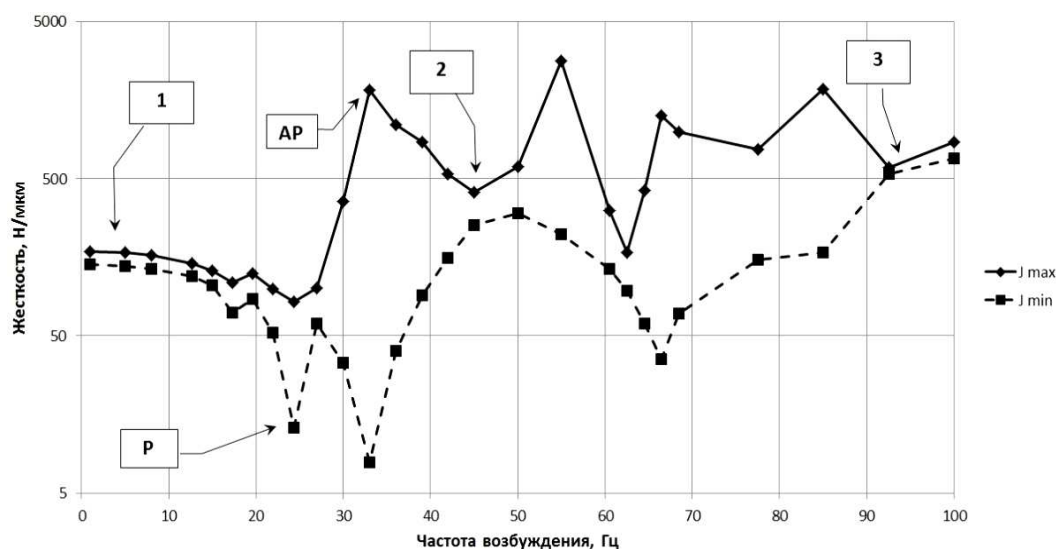


Рис. 7. Огибающие линии максимальной ($J_{\max}$) и минимальной ($J_{\min}$) жесткостей на шпинделе в плоскости XY для станка MC21Г25 (круговая сила)

Таблица 8

Сравнение перемещений шпинделя в статическом случае и при возбуждении моды М4 «Клевки портала» круговой силой на станке MC21Г25

Частота $f_{\text{и}}$, Гц	Перемещения по направлениям, мкм		
	δ_x	δ_y	δ_z
1 (почти статика)	0,71	0,58	0,12
33 (мода М4)	12,77	0,05	5,34
Оценка	Резонанс (рост 17,9 раз)	Антирезонанс (падение 11,6 раз)	Перекрестная связь (crosstalk) « δ_x на δ_z »

Вернемся к графикам на рисунке 7. Как пики, так и провалы на них являются нежелательными местами для ведения обработки на станке. Во-первых, недопустима низкая жесткость станка в каком-либо направлении. Во-вторых, нежелательна сильно различающаяся по направлениям жесткость. В-третьих, как резонансы, так и антирезонансы непродолжительны по частотной шкале. Небольшие изменения параметров могут резко изменить динамику обработки.

В результате выявляется, что использовать станок можно использовать только в трех диапазонах: дорезонансном (маркер 1 на рисунке 7) на частотах < 15 Гц; межрезонансном (2) на частотах ~ 45 Гц; зарезонансным (3) на частотах $> 80 \dots 90$ Гц. В этих диапазонах отсутствуют резонансные явления. Жесткость в плоскости XY примерно одинакова в любом направлении. Средняя жесткость повышается с частотой. В дорезонансном (почти статическом) диапазоне она составляет примерно 150 Н/мм. В межрезонансном диапазоне достигает 330 Н/мм. В зарезонансном диапазоне на частоте 90 Гц средняя жесткость повышается до 560 Н/мм. Понятно, что дорезонансный диапазон пригоден для медленной, возможно, силовой обработки. Проблемой межрезонансного диапазона является его узость. Зарезонансный диапазон очень перспективен и пригоден для высокоскоростной обработки (ВСО) [8]. Фреза должна быстро вращаться, может потреблять большую мощность, но не должна создавать больших сил резания

(малые глубины резания и подачи на зуб). В зарезонансном диапазоне станок с субтильной несущей системой становится весьма жестким. Нужно лишь предвидеть и обходить локальные резонансы частей станка (например, шпинделя в опорах).

Итак, перспективно совместно использовать ВСО и зарезонансный диапазон, где динамическая жесткость несущей системы станка естественным образом повышается. Для обеспечения высокой частоты вращения инструмента нужна подготовка шпиндельного узла и главного привода. Высокоскоростная обработка позволит использовать облегченные несущие системы портала, уйти от понятия «тяжелый» станок «Гентри».

Обсуждение результатов моделирования. Статическая жесткость обоих станков находится на достаточном уровне. В горизонтальной плоскости она (радиальная жесткость) почти не зависит от направления (X , Y или промежуточное). Это оказывает положительное влияние на точность низкоскоростной обработки. Статическая жесткость в вертикальном направлении Z (осевая жесткость) превышает радиальную не менее чем в 1,4 раза (МС620, вылет ползуна 200 мм). Различие усиливается при увеличении вылета ползуна (2,5 раза для МС21Г25 при вылете 500 мм).

Статическая радиальная жесткость «облегченного» станка МС21Г25 в среднем в 1,75 раза ниже, чем «тяжелого» МС620. Это ожидаемое обстоятельство, но многое зависит от вылета ползуна [7].

После проявления динамических эффектов (от М1 и выше) равномерность жесткости по осям станка теряется для большинства участков диапазона интереса. Попадание на резонансный пик резко снижает жесткость по одной, иногда двум осям станка. Динамическая жесткость по третьей оси, как правило, растет и превышает статический уровень.

Для обоих станков возбуждение моды М2 «Складывание параллелограмма» приводит к падению динамической жесткости. Работать на этом резонансном пике недопустимо.

Резонанса по моде М4 «Клевки портала» нужно избегать на обоих станках. Особенно опасен он на МС21Г25, отчасти из-за большего вылета ползуна. Здесь динамическая жесткость падает до рекордно низкого уровня. Это в 18 раз меньше статического показателя.

Клевковые моды М1, М4 сопряжены друг с другом различием частот примерно вдвое (на октаву). Это наблюдается для обоих рассмотренных станков. Для МС620 $f_1 = 19,9$ Гц, а $f_4 = 41,9$ Гц. Станку МС21Г25 соответствуют числа 17,3 и 33,0 Гц.

Двукратное различие частот ($f_4 \cong 2f_1$) усиливает возбуждаемость станков. При периодической, но не гармонической, силе резания ожидается совместное проявление мод М1 и М4. Пусть в силе резания есть импульсная компонента, например, от входа-выхода зубьев фрезы в обрабатываемую деталь. Импульсы силы при случайном совпадении с частотой моды М1 начнут через период возбуждать и моду М4. И наоборот, порции энергии в моду М1 будут накачиваться при резонансе моды М4.

Следовательно, моды М1 и М4 могут оказаться активными одновременно. Это должно усложнить динамическое поведение станка и понизить его динамическую жесткость. В рамках данной работы эта ситуация не моделируется, так как здесь рассматривается классическое линейное гармоническое возбуждение. Падение жесткости на пике М1 менее выражено, чем на М2 и М4. Следует отметить, что на этом резонансе динамическая жесткость по X «тяжелого» станка до 1,7 раз меньше, чем «облегченного». Следовательно, массивность конструкции не является гарантией динамического качества.

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) при гармоническом нагружении станков «Гентри» силами на шпинделе существенно возбуждаются три резонанса. Каждый резонансный пик строго соответствует одной собственной моде. Комбинации мод в резонансных возбуждениях не обнаружены;

2) возбуждаемыми модами являются М1 «Клевки портала», М2 «Складывание параллелограмма», М4 «Клевки траверсы». Соответствующие резонансные пики стоят на АЧХ в последовательности М1-М2-М4. Они образуют резонансный диапазон частот протяженностью в одну октаву;

3) резонансный диапазон М1-М2-М4 лучше считать запретным для обработки из-за близости резонансных пиков друг к другу. Для тяжелых станков типа МС620 диапазон соответствует 17...45 Гц, а для облегченных станков типа МС21Г25 – примерно 15...40 Гц;

4) клевковые моды М1, М4 сопряжены друг с другом двукратным различием частот (на октаву). Это наблюдается для обоих рассмотренных станков. Двукратное различие частот ($f_4 \cong 2f_1$) усиливает динамичность станков. При периодической, но не гармонической силе резания ожидается совместное возбуждение мод М1 и М4;

5) МКЭ-моделирование указывает, что динамическое поведение всех станков МЗОР типа «Гентри» одинаково. Имеется три «спокойных» диапазона для обработки: дорезонансный (статический, до пика М1), межрезонансный (между группами пиков, трудный для использования из-за узости) и зарезонансный (выше М5, М6);

6) рассмотренные станки обладают существенной перекрестной связью продольных (X) и вертикальных (Z) перемещений шпинделя. Эта связь (crosstalk) усиливается в динамике. Приложение гармонической силы по X возбуждает примерно равные колебания по X и Z . То же происходит и при действии силы по Z ;

7) перспективен переход на станках «Гентри» к высокоскоростной обработке (ВСО) в зарезонансном диапазоне. Это обеспечивает рост динамической жесткости несущей системы не менее чем втрое;

8) переход к высокоскоростной обработке на зарезонансных частотах открывает возможность для облегчения портала «Гентри» при одновременном повышении производительности и качества поверхности деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 312 с.
2. Кирайт, Ю.Н. Продукция УП «МЗОР» / Ю.Н. Кирайт // Машиностроение-2010: технологии – оборудование – инструмент – качество: междунар. науч.-техн. конф., Минск, 7–8 апр. 2010 г. / Минск: Бизнесофсет, 2010. – С. 91–92.
3. Lopez de Lacalle, L.N. Machine Tools for High Performance Machining // L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. – Springer. – 2009. – 442 p.
4. Анализ жесткости подвижного портала продольно-фрезерного станка типа «Гентри» / В.И. Туромша [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2011. – № 3(46). – С. 15–28.
5. Модальный анализ портала тяжелого продольно-фрезерного станка типа «Гентри» / В.И. Туромша [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3.
6. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
7. Повышение жесткости ползуна продольно-фрезерного станка с подвижным порталом / В.И. Туромша [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2011. – № 11. – С. 104–112.
2. Кунец, Г. Высокоскоростная обработка и традиционный технологический базис: преодоление несовместимости / Г. Кунец // Мир техники и технологий. – 2004. – № 6. – С. 35–37.

Поступила 24.03.2014

HARMONIC ANALYSIS OF PORTALS FOR HEAVY GANTRY-TYPE MILLING MACHINES BY FEA

S. DOUNAR, A. YAKIMOVITCH, I. KOVALEVA, I. SHUMSKY

Dynamic FEA simulation of portals for two heavy gantry-type milling machines is provided. Rotary horizontal force and vertical oscillating force were applied to the spindle. FRFs were calculated. Excited eigenmodes ($M1$, $M2$, $M4$) revealed. Similarity and stability of both machine dynamic behavior was showed. Effects of antiresonance and crosstalk deformation are detected. Three appropriate for machining frequency ranges (pre-resonance, inter-resonance, post-resonance) are founded out. Possibility of mass reduction for HSM-aimed machines is showed.

УДК 62-531.7

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ЕЕ РАСПИЛИВАНИЯ

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

Рассматривается проблема повышения интенсивности распиливания при сообщении эллиптического движения распиливаемой заготовке. В ходе проведения исследования получены зависимости величины импульса ударной силы, действующего в процессе ударно-фрикционного взаимодействия режущей кромки распиловочного диска с поверхностью заготовки, при различных параметрах эллиптической траектории ее движения. Показано, что сообщение заготовке в процессе ее распиливания управляемого эллиптического движения позволяет целенаправленно влиять на условия ее ударного взаимодействия с режущей кромкой диска.

Предметом исследования данной работы является процесс механического распиливания твердых и сверхтвердых материалов, в частности монокристаллов алмаза при производстве из них бриллиантов и других изделий [1]. Выполняется эта операция на специальной распиловочной секции с использованием гравитационной подачи заготовки (рис. 1).

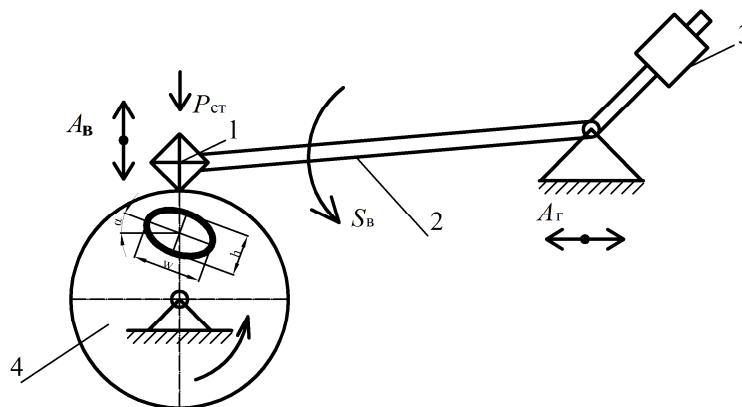


Рис. 1. Принципиальная схема распиливания монокристаллов алмаза с гравитационной подачей заготовки

Обрабатываемый кристалл 1 закрепляется на одном конце качающегося рычага (стрелы) 2 и путем придания последнему неуравновешенного состояния, что обеспечивается за счет изменения положения противовеса 3 на его противоположном конце, прижимается под действием статического усилия $P_{ст}$ к режущей кромке тонкого вращающегося распиловочного диска 4. При постоянной частоте вращения последнего и его режущей способности интенсивность распиливания определяется значением статической нагрузки, с повышением которой она возрастает. Однако на практике максимальное значение $P_{ст}$ ограничивается условием потери устойчивости распиловочного диска к деформации продольного изгиба, что приводит к отклонению плоскости распиливания кристалла от направления, заданного его разметкой. Именно это обстоятельство ограничивает значение интенсивности распиливания за счет повышения статического усилия прижатия кристалла к режущей кромке диска.

Согласно результатам исследований [2; 3], существенно повысить интенсивность распиливания можно за счет сообщения заготовке вынужденных колебаний A_v (см. рис. 1), направленных перпендикулярно режущей кромке диска. В этом случае условия их контактного взаимодействия характеризуются наличием периодических ударных импульсов, которые, в отличие от статического нагружения, интенсифицируют процесс хрупкого разрушения материала заготовки.

Дальнейшее совершенствование способа виброударного распиливания связано с использованием распиловочной секции, оснащенной оригинальной колебательной системой, обеспечивающей придание заготовке двумерного периодического циркуляционного движения, совершаемого в плоскости распиливания [4; 5]. Траектория этого движения имеет форму, близкую к эллипсу (см. рис. 1), и характеризуется

величиной h малой его оси и большой оси w , а также значением угла α наклона последней к горизонтальной оси. При этом за счет изменения параметров и условий возбуждения колебательной системы можно управлять указанными параметрами эллиптической траектории движения заготовки. В свою очередь, это дает возможность в широком диапазоне изменять условия ударно-фрикционного взаимодействия заготовки с режущей кромкой распиловочного диска, а соответственно, целенаправленно влиять на протекание процесса хрупкого разрушения обрабатываемого материала.

В этой связи цель данной работы заключалась в теоретической оценке влияния параметров циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания.

Для вычисления импульса ударной силы воспользуемся следующими допущениями. Так, всю массу системы m сосредоточим в одной точке, двигающейся по эллиптической траектории с длиной большой оси, равной w , и длиной малой оси, равной h . Согласно работе [6], торцевую поверхность режущего инструмента представим в виде плоского полотна. Центр координат расположим на вершине полотна, как показано на рисунке 1. Тогда изменения координат движения материальной точки по эллиптической траектории в течение времени t будет выражаться следующим образом:

$$\begin{cases} x' = w \cos t + x_0, \\ y' = h \sin t + y_0, \end{cases} \quad (1)$$

где x_0, y_0 – координаты центра эллиптической траектории.

В случае наклона эллиптической траектории движения точки под углом α к поверхности режущего инструмента (см. рис. 1) система (1) преобразуется к виду

$$\begin{cases} x = w \cos t \cos \alpha - h \sin t \sin \alpha + x_0, \\ y = w \cos t \sin \alpha + h \sin t \cos \alpha + y_0. \end{cases} \quad (2)$$

Теперь, согласно [7], проекции на оси X и Y скорости точки при ее движении по эллиптической траектории будут равны

$$\begin{cases} V_x = \dot{x}(t) = -w \sin t \cos \alpha - h \cos t \sin \alpha, \\ V_y = \dot{y}(t) = -w \sin t \sin \alpha + h \cos t \cos \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Полная скорость V точки составит

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{h^2 \cos^2(t) + w^2 - w^2 \cos^2(t)}.$$

Угол наклона скорости V точки к оси X (угол падения материальной точки на торцевую поверхность режущего инструмента при их косом соударении) будет вычисляться, согласно [7], как

$$\alpha_X = \frac{V_x}{V} = \frac{-w \sin t \cos \alpha - h \cos t \sin \alpha}{\sqrt{h^2 \cos^2(t) + w^2 - w^2 \cos^2(t)}}. \quad (4)$$

Тогда, согласно [7], полный импульс ударной силы определим из выражения

$$\begin{aligned} S &= mV(1+K) \cos \alpha_X \sqrt{1+f_{mp}^2} = m \sqrt{h^2 \cos^2(t) + w^2 - w^2 \cos^2(t)} (1+K) \times \\ &\times \cos \left(\frac{-w \sin t \cos \alpha - h \cos t \sin \alpha}{\sqrt{h^2 \cos^2(t) + w^2 - w^2 \cos^2(t)}} \right) \sqrt{1+f_{mp}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где K – коэффициент упругого восстановления при ударе; f_{mp} – коэффициент трения скольжения.

На рисунке 2 приведена зависимость полного импульса ударной силы для каждой точки эллиптической траектории при различных значениях угла α ее наклона к торцевой поверхности режущего инструмента (к оси X). Импульс ударной силы, как видно из рисунка 2, изменяется по закону косинуса, при этом увеличение угла наклона эллиптической траектории с 0 до 60° вызывает двукратное увеличение амплитуды этого изменения, а также сдвиг фазы такого движения. Однако чем выше угол наклона такой траектории, тем меньший ее участок контактирует с поверхностью режущего инструмента, что показано на рисунке 3. В этой связи важно оценить суммарный полный импульс ударной силы для каждой точки эллиптической траектории, в которой обрабатываемая заготовка находится в контакте с режущим инструментом, и сравнить полученное значение с импульсом, сообщаемым заготовке под действием только

гравитационной подачи, обусловленной действием силы тяжести при обычном резании за период эллиптического движения заготовки, и вычисляемым по формуле

$$S_{стам} = mgN, \quad (6)$$

где $N = 3600$ – количество циклов итераций за период циркуляционного движения.

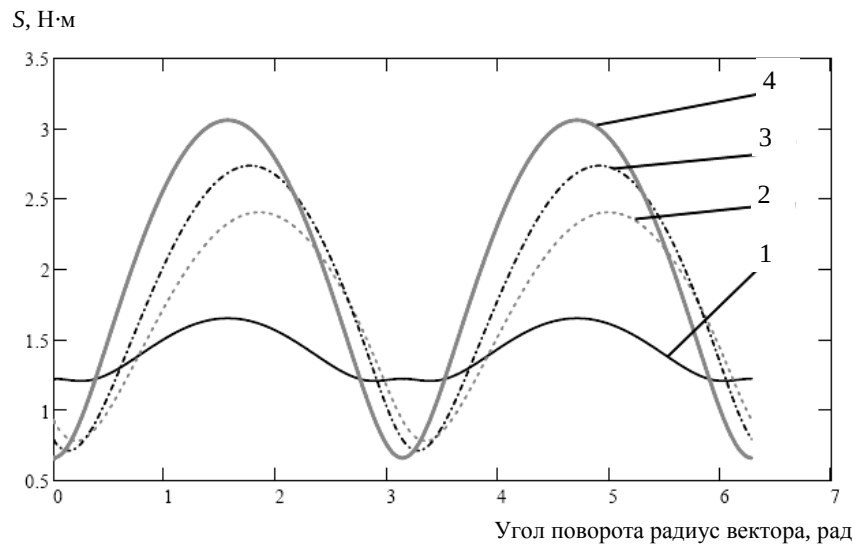


Рис. 2. Характер изменения полного импульса ударной силы от угла поворота радиус-вектора ($w = 40$ мм, $h = 16$ мм, $m = 0,05$ кг) при различных углах наклона эллиптической траектории: 1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 30^\circ$; 3 – $\alpha = 45^\circ$; 4 – $\alpha = 60^\circ$

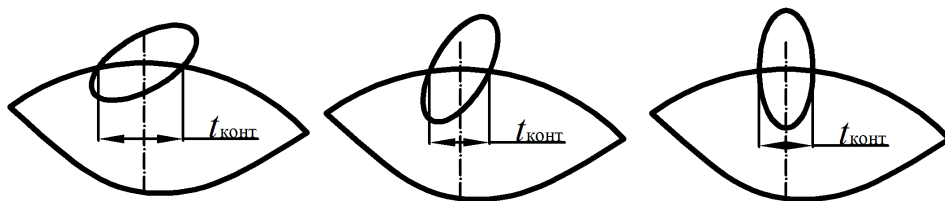


Рис. 3. Схема, отображающая изменение времени контакта $t_{\text{конт}}$ заготовки и инструмента при различном наклоне эллиптической траектории перемещения заготовки к поверхности режущего инструмента

Для оценки интервала итераций, при которых происходит взаимодействие движущейся по эллиптической траектории заготовки с режущим инструментом производилась оценка вектора вертикальных координат у каждой точки эллиптической траектории и нахождение начала $i_{\text{нач}}$ и конца $i_{\text{кон}}$ интервала, определяемых с помощью следующих условий:

$$\begin{aligned} i_{\text{нач}} &= i \text{ если } y_i \leq 0 \text{ и } y_{i-1} > 0, \\ i_{\text{кон}} &= i \text{ если } y_{i-1} < 0 \text{ и } y_i \geq 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где y_{i-1} , y_i – элементы вектора вертикальных координат у каждой точки эллиптической траектории.

Тогда суммарный полный импульс ударной силы для каждой точки эллиптической траектории, в которой обрабатываемая заготовка находится в контакте с режущим инструментом, будет вычисляться по формуле

$$S_{\text{эл}} = \sum_{i_{\text{нач}}}^{i_{\text{кон}}} S_i, \quad (8)$$

где S_i – полный импульс ударной силы в каждой точке эллиптической траектории при ее контакте с режущим инструментом, вычисляемый по формуле (5).

На рисунке 4 приведена зависимость отношения $S_{\text{эл}} / S_{\text{стам}}$ для различных углов α наклона эллиптической траектории.

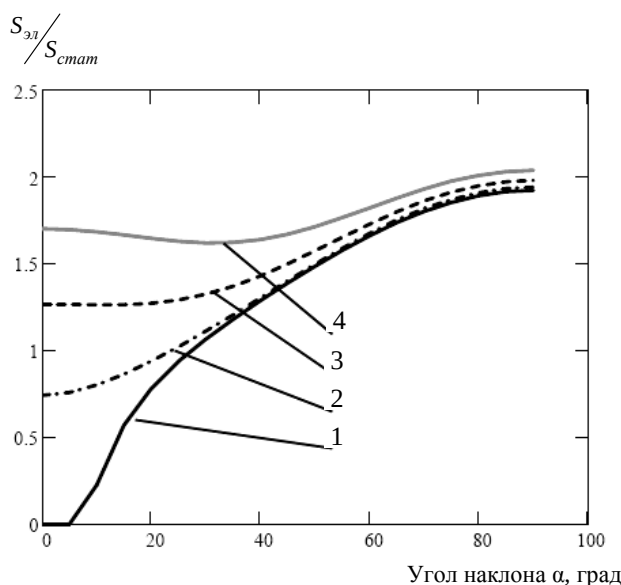


Рис. 4. Характер изменения отношения $S_{эл}/S_{стат}$ от угла α наклона эллиптической траектории при различных соотношениях малой и большой осей эллипса:
1 – $h/w = 0,2$; 2 – $h/w = 0,4$; 3 – $h/w = 0,6$; 4 – $h/w = 0,8$

Из полученных данных видно, что при соотношении величин малой и большой полуосей эллипса, превышающем или равном 0,6, интенсивность суммарного импульса сил резания при взаимодействии между режущим инструментом и заготовкой, двигающейся по эллиптической траектории, при любом угле наклона последней будет больше, чем в случае их взаимодействия только под действием силы тяжести при гравитационной подаче. При этом с увеличением угла наклона эллиптической траектории данное соотношение возрастает. При меньших соотношениях полуосей эллиптической траектории присутствует диапазон значений угла наклона эллиптической траектории $\alpha_{пред}$, в которых распиливание с гравитационной подачей будет характеризоваться большей интенсивностью по сравнению со случаем движения заготовки по эллиптической траектории. Так, при соотношении $h/w = 0,2$ угол $\alpha_{пред} = 30^\circ$, а при $h/w = 0,2$ угол $\alpha_{пред} = 25^\circ$.

Таким образом, из представленных данных можно сделать вывод, что для получения высокой интенсивности распиливания необходимо сформировать эллиптическую траекторию движения заготовки с соотношением малой и большой полуосей не менее 0,6. Для экспериментального подтверждения полученных результатов проведена серия опытов с использованием модернизированной распиловочной секции, описание конструкции которой приведено в работе [8].

Для измерения нормальной составляющей силы соударения заготовки с диском за время их контактного взаимодействия использовалась следующая методика. На месте шпиндельного узла диска в специальном приспособлении 1 (рис. 5) закреплялась предварительно протарированная тензометрическая балка 2.

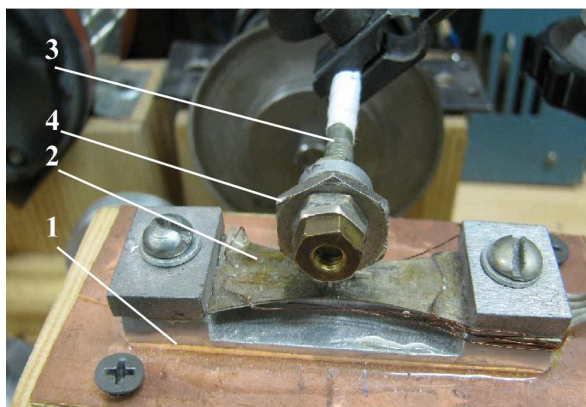


Рис. 5. Общий вид устройства для измерения нормальной составляющей силы соударения оправки (заготовки) с тензометрической балкой (диском)

На рабочем конце стрелы устанавливалась оправка 3, имеющая узкую выступающую часть 4, которой она при двухмерном колебательном движении периодически воздействовала на поверхность тензосметрической балки, вызывая ее деформацию. Сигнал от тензодатчиков, пропорциональный изменению нормальной составляющей силы удара P_d , поступал на усилитель и далее подавался на цифровой запоминающий осциллограф CWINTEK GDS-71152A.

По полученным осциллограммам и с учетом тарифовочных данных тензобалки определялись характер изменения и величина нормальной составляющей силы соударения заготовки с диском за время их однократного взаимодействия, а также ее максимальное значение $P_{d\max}$.

Осциллограмма изменения напряжения, создаваемого при взаимодействии оправки и тензобалки, полученная при одном из режимов работы модернизированной распиловочной секции, приведена на рисунке 6.

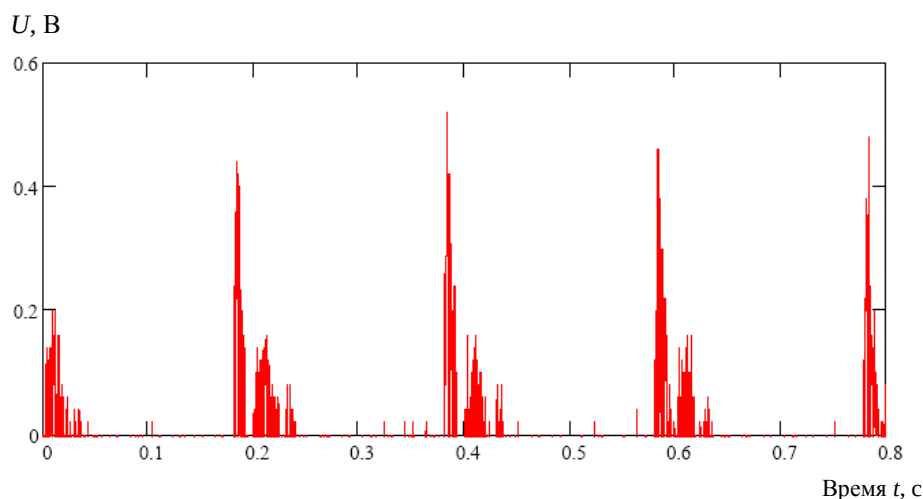


Рис. 6. Изменения напряжения на тензобалке

Для обработки полученной осциллограммы применялся программный продукт MathCAD, в котором выполнялось сглаживание полученного сигнала и его интерполяция кубическим сплайном.

Проведение такой обработки позволило вычислить среднее значение *нормальной* составляющей силы ее соударения.

Применительно к распиловочной секции, оснащенной колебательной системой, описание которой приведено в работе [8], важной характеристикой, влияющей на размеры и форму формируемой циркуляционной траектории, является величина зазора между плоскостью стрелы распиловочной секции и ее верхним упругим ограничителем. Исходя из указанного, важно оценить уровень динамического взаимодействия заготовки и режущего инструмента в зависимости от данного показателя.

На рисунке 7 приведено измеренное таким образом отношение среднего значения нормальной составляющей силы ее соударения к уровню статической нагрузки в зависимости от величины указанного зазора.

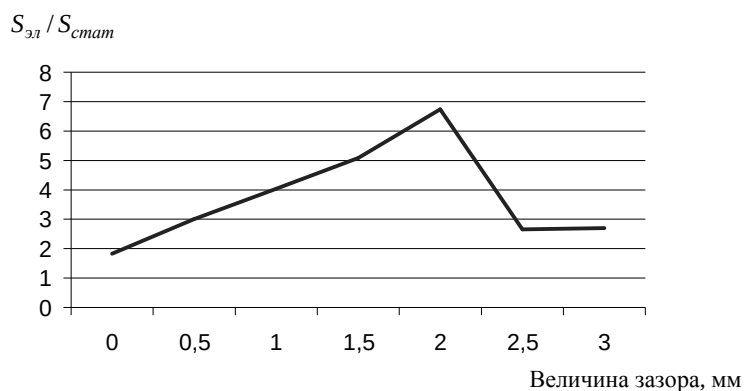


Рис. 7. Отношение средней динамической силы к ее статическому значению в зависимости от величины зазора

Как видно, использование верхнего ограничителя позволяет существенным образом изменять величину нормальной динамической силы, что, как указывалось выше, достигается изменением формы и размером формируемой траектории движения заготовки. Таким образом, учитывая изложенные в работе [1] особенности механизма разрушения материала, заключающиеся в прямой зависимости интенсивности выполнения распиливания от величины прижатия режущего инструмента к дну пропила заготовки, введение в конструкцию распиловочной секции ограничителя предоставляет возможность дополнительного управления процессом разрушения материала заготовки путем регулирования наклоном и размерами формируемой циркуляционной траектории. Это в свою очередь определяет величину суммарного импульса ударной силы при контакте заготовки с режущей кромкой диска, а соответственно, изменяет интенсивность протекания процесса распиливания.

Закключение. На основании результатов предшествующих исследований доказано, что перспективным направлением повышения интенсивности распиливания твердых и сверхтвердых материалов является сообщение заготовке вынужденных колебаний, обеспечивающих виброударный режим ее взаимодействия с режущей кромкой диска. Такой режим обработки по сравнению с традиционными условиями распиливания, при которых прижатие заготовки к диску обеспечивается под действием статической (гравитационной) нагрузки, существенно интенсифицирует процесс хрупкого разрушения обрабатываемого материала.

Показано, что дальнейшее совершенствование способа виброударного распиливания связано с обеспечением двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки, совершаемого ею в плоскости распиливания по траектории, близкой к эллиптической. По сравнению с одномерным колебательным движением заготовки, направленным перпендикулярно режущей кромке диска, придание ей двухмерного циркуляционного движения по эллиптической траектории позволяет за счет изменения ее параметров, включая размеры малой и большой осей эллипса, а также угла наклона последней к горизонтальной оси, в широком диапазоне управлять условиями ударно-фрикционного взаимодействия заготовки с режущей кромкой распиловочного диска, а соответственно и протеканием процесса хрупкого разрушения обрабатываемого материала.

В основу теоретической оценки степени влияния циркуляционного движения заготовки на интенсивность хрупкого разрушения ее материала положено вычисление величины импульса ударной силы, действующего в процессе ударно-фрикционного взаимодействия режущей кромки распиловочного диска с поверхностью заготовки, при различных параметрах эллиптической траектории ее движения.

Приняв ряд допущений (масса заготовки сосредоточена в одной точке, двигающейся по эллиптической траектории, а режущая кромка диска представлена в виде плоского полотна) и используя основные положения теории удара, получены теоретические зависимости, отражающие влияние параметров эллиптического движения заготовки на величину полного ударного импульса в процессе ее ударно-фрикционного взаимодействия с распиловочным диском.

На основании обобщенного анализа полученных теоретических зависимостей установлено:

- при постоянном отношении малой и большой осей эллипса по мере увеличения угла λ между последней и горизонтальной осью от 0 до 60° происходит возрастание импульса ударной силы и одновременно уменьшается продолжительность контактного взаимодействия заготовки с режущей кромкой распиловочного диска;

- в случае неизменного значения угла α , отличного от нуля, по мере увеличения отношения h/w величина импульса ударной силы возрастает, а при $h/w > 0,6$ она при всех значениях угла α оказывается больше, чем в случае взаимодействия заготовки с распиловочным диском в обычных условиях обработки.

С помощью методики, основанной на использовании тензометрической балки и цифрового запоминающего осциллографа, экспериментально определены значения нормальной составляющей силы соударения заготовки с режущей кромкой диска и продолжительность их контактного взаимодействия за период циркуляционного движения заготовки. Показано, что применение колебательной системы, обеспечивающей двухсторонний виброударный режим взаимодействия стрелы с верхним и нижним упругими ограничителями, позволяет за счет регулирования зазора Z между стрелой и верхним ограничителем целенаправленно управлять параметрами эллиптического циркуляционного движения заготовки, а следовательно и условиями ее ударно-фрикционного взаимодействия с режущей кромкой распиловочного диска. Установлено, что для условий проводимых экспериментов с увеличением указанного зазора отношение величины импульса нормальной составляющей силы удара заготовки с режущей кромкой диска за период циркуляционного движения J_1 к значению за это же время статического импульса $J_{ст}$ практически линейно возрастает, достигая своего максимального значения $J_1/J_{ст} = 6,8$ при $Z = 2$ мм, а при дальнейшем увеличении зазора это отношение резко уменьшается.

Таким образом в результате проведенных исследований теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что сообщение заготовке в процессе ее распиливания управляемого эллиптического циркуляционного движения позволяет целенаправленно влиять на условия ее ударно-фрикционного

взаимодействия с режущей кромкой диска, а соответственно и на интенсивность процесса хрупкого разрушения обрабатываемого материала. Показано, что путем изменения параметров циркуляционного эллиптического движения заготовки можно соответствующим образом управлять величиной суммарного импульса ударной силы при ее контактном взаимодействии с режущей кромкой диска, которая напрямую определяет интенсивность протекания процесса разрушения обрабатываемого материала. Принимая во внимание, что величина этого импульса может значительно превышать значение импульса, соответствующего условиям традиционной обработки, оправданно прогнозировать существенное повышение интенсивности распиливания заготовок из хрупких материалов при сообщении им циркуляционного движения, обеспечивающего их ударно-фрикционное взаимодействие с режущей кромкой диска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов, В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В.И. Епифанов, А.Я. Лесина, Л.В. Зыков; под ред. В.И. Епифанова. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
2. Киселев, М.Г. Повышение режущей способности распиловочных дисков путем применения виброударного режима обработки / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, А.С. Словеснов // Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы докладов 6-й междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2004. – С. 301–303.
3. Дроздов, А.В. Повышение производительности и качества распиливания сверхтвердых кристаллов путем сообщения заготовке вынужденных колебаний: автореф. дис. канд. техн. наук / А.В. Дроздов. – Минск, 2005. – 21 с.
4. Киселев, М.Г. Повышение интенсивности и качества распиливания твердых сверхтвердых материалов путем сообщения заготовке двухмерного циркуляционного движения / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Вестн. БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 36–40.
5. 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.
6. Киселев, М.Г. Теоретическая оценка степени влияния ультразвука на повышение производительности процесса механического распиливания монокристаллов сверхтвердых материалов / М.Г. Киселев, Г.А. Галенюк, А.В. Дроздов // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2004. – № 2. – С. 55–59.
7. Курс теоретической механики: учебник для вузов / В.И. Дронг [и др.]; под общ. ред. К.С. Колесникова. – 3-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 736 с.
8. Киселев, М.Г. Влияние условий возбуждения стрелы распиловочной секции на параметры колебательного движения заготовки / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, Д.А. Ямная // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – № 1, Т. 18. – С. 78–85.

Поступила 28.04.2014

THEORETICAL ESTIMATE OF THE EFFECT OF THE PARAMETERS OF THE CIRCULATING MOVEMENT OF THE WORKPIECE ON THE INTENSITY OF ITS CUTTING

M. KISELEV, A. DROZDOV, V. GABETS, D. YAMNAYA

In the article the substantiation of sawing intensity increase at the message of elliptic moving to sawing preparation is carried out. In result dependences of shock force pulse size of the active during percussion- frictional interaction of the sawing disk cutting edge with a surface of preparation at various parameters of an elliptic trajectory of its movement are received. It is shown, that the message to preparation during its sawing controlled elliptic movement allows to purposefully influence on conditions of its percussion interaction with a disk cutting edge.

УДК 621.941.01

**ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
ПОД ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ***д-р техн. наук, доц. И.А. КАШТАЛЬЯН**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Рассматривается метод формирования рельефа наружных и внутренних поверхностей деталей машин под газотермическое напыление на токарных станках с числовым программным управлением путем линейного и модулированного изменения подачи в функции пути. Представлены математические модели регулирования подачи. Приведены зависимости, устанавливающие взаимосвязь параметров управляющего воздействия с параметрами шероховатости и волнистости обработанных поверхностей.

Введение. Работоспособность деталей с покрытиями в значительной степени определяется прочностью сцепления нанесенного слоя с основой. При этом важной характеристикой основы является площадь поверхности, по которой осуществляется контакт с покрытием (с ее увеличением увеличивается и прочность сцепления). Следовательно, предварительная обработка поверхности основы с заданными характеристиками рельефа становится важным фактором прочного сцепления покрытия с деталью. Среди всего многообразия существующих способов подготовки поверхности под покрытия выделяют механические (точение, шлифование, галтовка и др.) [1; 2]. Отличительной особенностью этих способов является простота и возможность использования универсального технологического оборудования. Вместе с тем следует полагать, что для каждой системы «основа – покрытие» существуют некоторые оптимальные параметры рельефа поверхности, обеспечение которых позволяет добиться требуемой прочности сцепления. Часто это является сложной технологической задачей (особенно при подготовке под покрытие поверхностей вращения фасонного профиля). Для таких поверхностей характерным является неравномерный износ при их эксплуатации, причинами которого, например, являются различные величины удельного давления, силы трения и скорости скольжения на различных участках сопрягаемых поверхностей. Чтобы обеспечить равномерный износ на всех участках поверхности, прочность сцепления покрытия с основой на них может быть переменной. Следовательно, площадь, по которой осуществляется контакт основы с покрытием для участков поверхности одинаковой величины, расположенных в различных ее местах, должна быть также переменной. Фактически имеет место задача обеспечения нерегулярного рельефа поверхности при ее обработке под покрытие.

Основная часть. Анализ способов подготовки поверхностей деталей под нанесение покрытий показал, что переменный рельеф поверхностей вращения может быть получен на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) путем регулирования подачи. Причем целесообразно реализовать те изменения подачи, которые являются универсальными, т.е. могут быть использованы как типовые решения. К ним следует отнести линейное и модулированное изменение подачи в функции пути [3].

Программные модули, реализующие указанные изменения подачи, были включены в технологическое программное обеспечение микропроцессорного устройства ЧПУ КМ 65. При их разработке реализован способ управления, при котором параметр, используемый в качестве управляющего воздействия (подача), изменяется приращениями в функции пути, а уровень сигнала управления между приращениями остается постоянным и определяется частотой управляющих импульсов (формируется в функции времени).

Линейное изменение минутной подачи осуществляется приращениями величиной ΔS по мере обработки участка траектории длиной Δl (рис. 1). Управляющее устройство при этом реализует зависимость:

$$S_k = S_n \pm l \Delta S / \Delta l ,$$

где S_n и S_k – начальная и конечная скорости подачи соответственно, мм/мин; l – длина обработки, на которой подача изменяется от S_n до S_k , мм.

Значение ΔS выбирают из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин; значение Δl задают со знаком «плюс» или «минус» и принимают кратным единице дискретности перемещения (длине перемещения исполнительного органа станка при подаче от устройства ЧПУ одного импульса). При этом знак «плюс» указывает на увеличение подачи (разгон), а знак «минус» – на ее уменьшение (замедление). Текущее значение подачи после каждого приращения находится на прямой, начало которой в координатах «минутная подача – длина перемещения» определяется начальной скоростью подачи S_n , а угол наклона – отношением $\Delta S / \Delta l$. Параметры переменной подачи S_n , ΔS , Δl и направление изменения (знак приращения при Δl) задаются в кадре управляющей программы совместно с геометрической и технологической информацией.

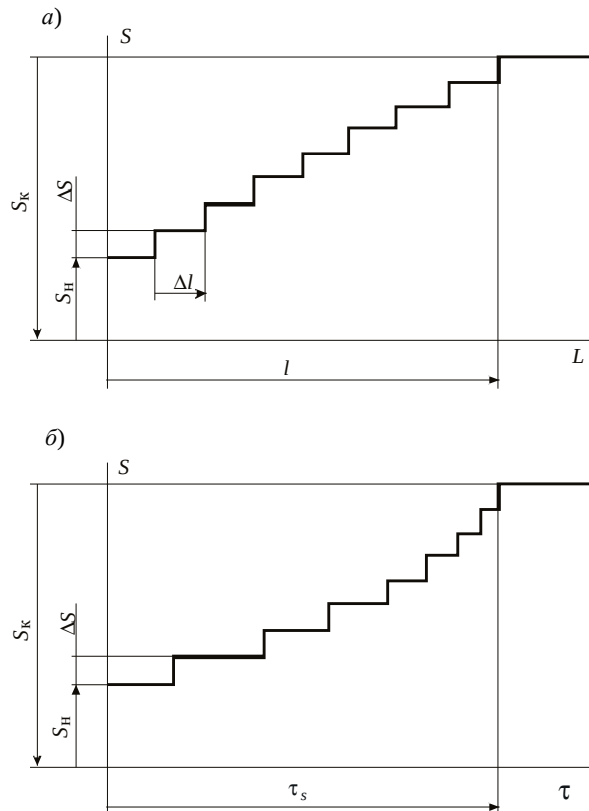


Рис. 1. Диаграммы изменения скорости подачи в функции пути (а) и в функции времени (б)

При реализации данного алгоритма время τ_s обработки участка поверхности заготовки длиной l равно сумме времен обработки участков длиной Δl на различной скорости подачи. В случае увеличения скорости подачи (разгона)

$$\tau_s = \sum_{k=1}^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H + (k-1)\Delta S},$$

где n_s – число приращений подачи на участке длиной l ($n_s = l/\Delta l$); k – переменная.

Приняв в качестве пределов интегрирования порядковые номера 1 и n_s членов ряда, между которыми необходимо определить сумму, получим

$$\tau_s = \int_1^{n_s} \frac{\Delta l}{S_H + (k-1)\Delta S} dk.$$

После преобразования этого выражения

$$\tau_s = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln(S_H + n_s \Delta S) - \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln S_H,$$

откуда

$$n_s = \frac{e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H}{\Delta S}. \quad (1)$$

Расстояние Δl между приращениями подачи есть величина постоянная для каждого члена ряда, поэтому текущее значение координаты точки, в которой находится вершина резца в момент времени τ_s , может быть определено по формуле

$$l_{\tau_s} = n_s \Delta l. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) получим

$$l_{\tau_s} = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H \right). \quad (3)$$

Если предположить, что время одного оборота заготовки $\tau_o = \tau_s - \tau'_s$, то разность пути l_{τ_s} , пройденного за время τ_s , и пути $l_{\tau'_s}$, пройденного за время τ'_s , является подачей на оборот S_o :

$$S_o = l_{\tau_s} - l_{\tau'_s}. \quad (4)$$

Используя зависимость (3), выражение (4) можно представить в следующем виде

$$S_o = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s} S_H + \Delta S - S_H \right) - \frac{\Delta l}{\Delta S} \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau'_s} S_H + \Delta S - S_H \right). \quad (5)$$

После замены в зависимости (5) τ'_s на разность $\tau_s - \tau_o$ и преобразований получим

$$S_o = \frac{S_H \Delta l}{\Delta S} \left(1 - 1/e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_o} \right) e^{\frac{\Delta S}{\Delta l} \tau_s}. \quad (6)$$

Экспериментальная проверка влияния параметров переменной подачи на шероховатость поверхности проводилась с использованием токарного станка с ЧПУ мод.1734ФЗ (дискретный привод подачи с

шаговым двигателем) и станка мод.1А734Ф3 (следящий привод подачи с высокомоментным двигателем постоянного тока). Обработывались образцы из стали 40ХН. Обработка велась подрезно-проходным резцом с механическим креплением трехгранной режущей пластины из твердого сплава Т15К6. Геометрические параметры режущей части: $\varphi = 95^\circ$; $\varphi_1 = 5^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 12^\circ$; $\lambda = 8^\circ$; $r_e = 0,8$ мм. Запись микронеровностей по всей длине поверхности, обработанной с переменной подачей, проводилась на профилометре-профилографе мод.201. Шероховатость поверхности оценивалась по значениям Rz и Ra . Графики строились по средним значениям, полученным в результате обработки тридцати профилограмм.

Влияние подачи на шероховатость поверхности при её плавном увеличении от $S_n = 0,02$ мм/об до $S_k = 0,5$ мм/об, а затем плавном уменьшении до первоначального значения исследовали при обработке образцов диаметром 60 мм, частоте вращения $n_u = 500$ об/мин и глубине резания $t = 1$ мм. Заготовка в патроне крепилась консольно (длина консоли 50 мм). Параметры переменной подачи были приняты следующими: $\Delta S = 0,1$ мм/мин; $\Delta l = 0,01$ мм.

Установлено (рис. 2), что для случая изменения подачи в сторону разгона значения Rz и Ra больше. Это заметнее на участках, обработанных с малыми подачами (диапазон от 0,04 до 0,24 мм/об) на станках, оснащенных дискретным приводом подачи. Величины Rz и Ra при обработке с постоянной подачей в свою очередь значительно больше, чем при обработке с переменной.

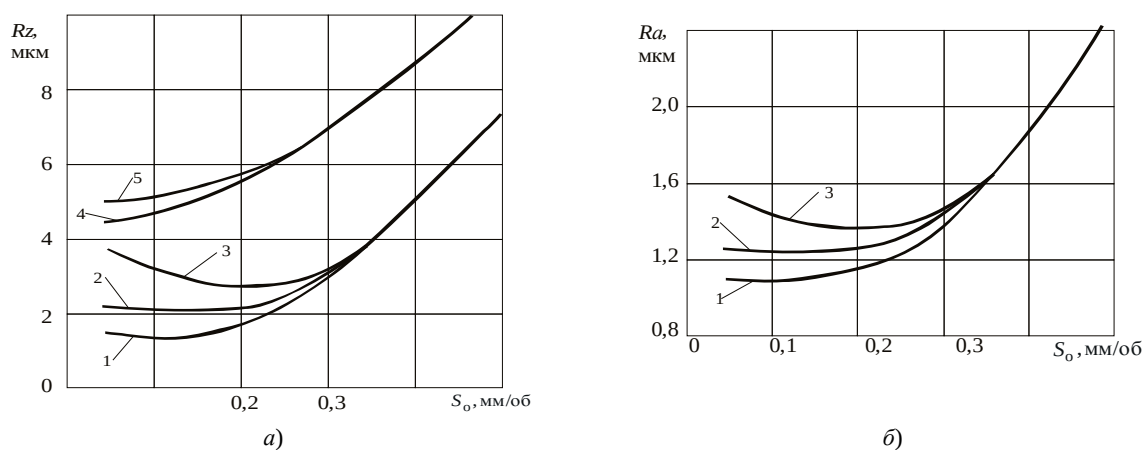


Рис. 2. Зависимость высоты неровностей Rz (а) и среднего арифметического отклонения профиля Ra (б) при точении:
1, 2 – соответственно замедленное и ускоренное перемещение резца с $\varphi_1 = 5^\circ$;
3 – обработка с постоянной подачей резцом с $\varphi_1 = 5^\circ$;
4, 5 – соответственно замедленное и ускоренное перемещение резца с $\varphi_1 = 45^\circ$

Явление образования более «чистой» поверхности при точении с переменной подачей по сравнению с обычной обработкой можно объяснить следующим образом. На токарных станках с ЧПУ и шаговым приводом подач скорость перемещения исполнительного органа определяется частотой управляющих импульсов, поступающих на обмотки шагового двигателя. Изменение подачи в диапазоне от 0,04 до 0,24 мм/об при частоте вращения шпинделя $n_u = 500$ об/мин и единице дискретности $Z_0 = 0,01$ мм соответствует частоте управляющих импульсов $\Psi_{0z} = 33...167$ Гц. В этом диапазоне частот импульсные свойства шагового двигателя проявляются в большей степени (перемещение исполнительного органа характеризуется чередованием скачков и остановок). Такое воздействие на механическую систему привода подач вызывает колебания ее отдельных элементов.

Исходя из тех же графиков (см. рис. 2) можно предположить, что уменьшение высоты микронеровностей при замедленном перемещении резца связано со значительной скоростью изменения подачи и малыми значениями вспомогательного узла в плане φ_1 ($\varphi_1 = 5^\circ$). Действительно, при значительной скорости изменения подачи происходит сближение вершины вновь образовавшегося гребешка с вершиной гребешка, образованного на предшествующем обороте заготовки. При этом резец вспомогательной режущей кромкой частично срезает вершины образованных ранее микронеровностей, величина которых ввиду пластических и упругих деформаций в зоне резания всегда значительно больше величины, определяемой только подачей и геометрией режущей части резца. С увеличением вспомогательного угла в плане φ_1 эффект уменьшения высоты микронеровностей при замедленном перемещении резца становится менее заметным.

Данное явление можно объяснить тем, что с увеличением вспомогательного узла в плане ϕ_1 до 45° вспомогательная режущая кромка, расположенная под большим углом к направлению подачи, не будет производить сглаживания острых вершин микронеровностей. Однако в данном случае ввиду плавного уменьшения толщины среза наступает момент, когда резец перемещается в слое металла, упрочнённого (наклепанного) на предшествующем обороте заготовки. При этом происходит частичное суммирование наклепов (следовательно и микротвердостей) [4].

Снижение вязкости обрабатываемого материала за счет наклёпа поверхностного слоя ведет к уменьшению шероховатости обработанной поверхности. По данным А.А. Маталина, такое явление наблюдается при развёртывании отверстий после зенкерования. Если припуск, оставленный на развёртывание, меньше глубины наклепанного зенкерованием слоя, поверхность в результате развёртывания имеет минимальную высоту микронеровностей [5].

При формообразовании закон изменения подачи в каждом конкретном случае определяется конструктивными параметрами поверхности и требованиями к ее рельефу. Существующее множество законов изменения подачи с приемлемой точностью могут быть аппроксимированы отрезками прямых, реализуемых по представленному алгоритму изменения минутной подачи в функции пути.

Модулированное изменение подачи заключается в периодическом ее увеличении от $S_{\min}$ до $S_{\max}$ с последующим снижением до первоначального значения. Подача между ее пиковыми значениями изменяется приращениями на величину ΔS по мере обработки участков Δl между этими приращениями. Для этого устройство ЧПУ поочередно реализует зависимости:

$$S_{\max} = S_{\min} + n_s \Delta S \quad \text{и} \quad S_{\min} = S_{\max} - n_s \Delta S,$$

где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от $S_{\min}$ до $S_{\max}$ (рис. 3).

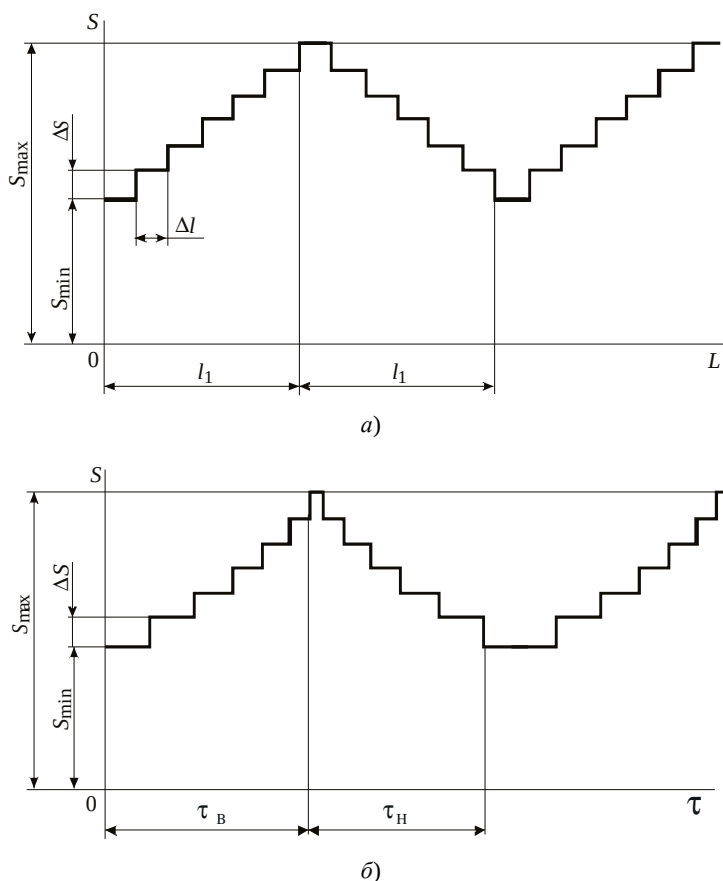


Рис. 3. Диаграммы модулированного изменения подачи в функции пути (а) и в функции времени (б)

Длина пути разгона (замедления) при этом определяется из выражения $l_1 = n_s \Delta l$; значение ΔS выбирается кратным 0,1 мм/мин; Δl принимается кратной единице дискретности.

Время разгона τ_b на участке длиной l_1 при реализации данного алгоритма может быть представлено выражением:

$$\tau_b = \frac{\Delta l}{\Delta S} \left[\ln(S_{\min} + n_s \Delta S - \Delta S) - \ln S_{\min} \right], \quad (7)$$

где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от $S_{\min}$ до $S_{\max}$.

Заменив в зависимости (7) n_s его значением из выражения $n_s = (S_{\max} - S_{\min}) / \Delta S$ и выполнив преобразование, получим

$$\tau_b = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max} - \Delta S}{S_{\min}}. \quad (8)$$

Время замедления (изменения подачи от $S_{\max}$ до $S_{\min}$) после соответствующих преобразований можно представить как

$$\tau_n = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max}}{S_{\min} + \Delta S}. \quad (9)$$

Время одного цикла τ_u^m модулированного изменения подачи можно определить, используя зависимость $\tau_u^m = \tau_b + \tau_n$. Подставляя в нее значение τ_b из выражения (8) и значение τ_n из выражения (9), после преобразования получим

$$\tau_u^m = \frac{\Delta l}{\Delta S} \ln \frac{S_{\max} (S_{\max} - \Delta S)}{S_{\min} (S_{\min} + \Delta S)}.$$

Основной причиной образования волнистости является отклонение действительной траектории движения обрабатываемой заготовки и инструмента от заданной. Периодическое увеличение (уменьшение) подачи в процессе обработки заготовки приводит к колебаниям сил резания и, как следствие, колебаниям величины деформаций в технологической системе, к образованию поперечной волнистости.

Экспериментальная проверка влияния модулированной подачи на образование поперечной волнистости проводилась при точении в патроне заготовок из стали 40ХН диаметром 70 и длиной 50 мм. Было обработано пять партий заготовок по 10 штук в каждой. Принятые параметры режима резания: скорость резания $v = 120$ м/мин; глубина резания $t = 1$ мм; длина обработки l_1 , соответствующая пути, на котором подача изменяется между ее пиковыми значениями, была равна 2,5 мм.

Для каждой партии заготовок выбирался определенный размах изменения подачи. Причем верхнее пиковое значение подачи, всегда было равно 0,4 мм/об. Волнистость обработанной поверхности записывали и измеряли по параметру Ra на профилографе-профилометре модели 201 с помощью приспособления для проверки волнистости. Ощупывание поверхности производилось щупом с радиусом сферы 2 мм.

Исследование волнограмм показало, что шаг образующихся поперечных волн всегда равен удвоенной длине l_1 , на которой происходит увеличение (уменьшение) подачи. Высота же волн зависит от величины размаха между пиковыми значениями подачи. Большему размаху соответствует большая высота волны.

Проведенный анализ большого количества волнограмм (более 100 штук), сил резания, возникающих при модулированном изменении подачи, и жесткости технологической системы показал, что высота поперечной волнистости целиком зависит от колебания составляющей силы резания P_y и жесткости технологической системы. Осциллограммы составляющей силы резания P_y при точении с модулированной подачей и соответствующие им волнограммы приведены на рисунке 4.

Действительно, периодическое увеличение (уменьшение) подачи в процессе обработки заготовки приводит к колебаниям сил резания и, как следствие, к колебаниям величины деформаций в технологической системе. При этом величина деформации технологической системы y от составляющей силы резания P_y выражается зависимостью

$$y = P_y / J, \quad (10)$$

где J – жесткость технологической системы, Н/мм.

Используя известную из теории резания зависимость для определения P_y , можно записать:

$$P_{y_{\max}} = C_{P_y} S_{o_{\max}}^{y_{P_y}} t^{x_{P_y}} v^{z_{P_y}}, \quad (11)$$

$$P_{y_{\min}} = C_{P_y} S_{o_{\min}}^{y_{P_y}} t^{x_{P_y}} v^{z_{P_y}}, \quad (12)$$

где $P_{y_{\max}}$ и $P_{y_{\min}}$ – максимальное и минимальное значения радиальной составляющей силы резания при модулированном изменении подачи, Н.

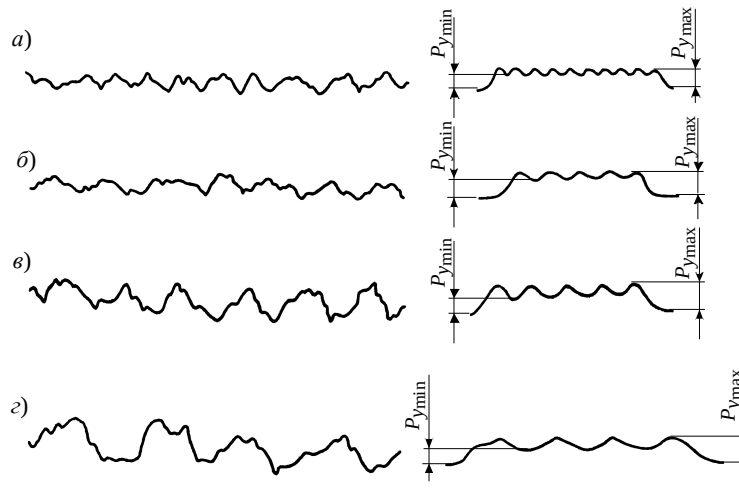


Рис. 4. Волнограммы поверхностей, обработанных с модулированной подачей (увеличение: вертикальное $\times 2000$, горизонтальное $\times 8$), и соответствующие им осциллограммы составляющей силы резания P_y 2000,

а – $S_{o_{\min}} = 0,24$ мм/об; $S_{o_{\max}} = 0,4$ мм/об; $l_1 = 0,4$ мм; б – $S_{o_{\min}} = 0,24$ мм/об; $S_{o_{\max}} = 0,4$ мм/об; $l_1 = 0,8$ мм;
в – $S_{o_{\min}} = 0,20$ мм/об; $S_{o_{\max}} = 0,5$ мм/об; $l_1 = 0,8$ мм; г – $S_{o_{\min}} = 0,20$ мм/об; $S_{o_{\max}} = 0,5$ мм/об; $l_1 = 1,25$ мм

В первом приближении высотой поперечной волны W_1 при модулированном изменении подачи является разность между деформациями технологической системы $y_{\max}$, определяемой силой $P_{y_{\max}}$, и $y_{\min}$, определяемой силой $P_{y_{\min}}$, то есть

$$W_1 = y_{\max} - y_{\min}. \quad (13)$$

Используя зависимость (10), выражение (13) можно представить в следующем виде:

$$W_1 = \frac{P_{y_{\max}} - P_{y_{\min}}}{J}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) значения $P_{y_{\max}}$ и $P_{y_{\min}}$ соответственно из (11) и (12), получаем

$$W_1 = \frac{K_{P_y} C_{P_y} (S_{o_{\max}}^{y_{P_y}} - S_{o_{\min}}^{y_{P_y}}) t^{x_{P_y}} v^{z_{P_y}}}{J}.$$

В приведенном выражении коэффициент K_{P_y} равен отношению среднего значения радиальной составляющей силы резания P'_y при модулированном изменении подачи к радиальной составляющей силы резания P_y при обычной обработке с подачей, равной среднему значению модулированной.

Большинство подрезно-проходных резцов с механическим креплением твердосплавной пластины обладают отрицательной жесткостью (явление, когда перемещение y противоположно направлению действия радиальной составляющей P_y). Это относится к использованному в экспериментах подрезно-

проходному резцу. Наличие отрицательной жесткости в данном случае объясняется поворотом пластины вокруг штифта под действием составляющей силы резания P_x . В результате поворота происходит смещение режущей кромки в направлении, перпендикулярном направлению действия составляющей силы резания P_x , на величину y_{nl} . Величина y_{nl} в каждом конкретном случае зависит от величины P_x и жесткости узла крепления пластины твердого сплава J_{nl} . Как правило, величина y_{nl} соизмерима с величиной деформации технологической системы y , вызываемой составляющей силы резания P_x , и может быть выражена зависимостью $y_{nl} = P_x / J_{nl}$. При этом высота поперечной волны W_2 , которая определяется отрицательной жесткостью твердосплавной пластины, может быть определена из следующего выражения:

$$W_2 = \frac{K_{P_x} C_{P_x} (S_{o_{max}}^{y_{P_x}} - S_{o_{min}}^{y_{P_x}}) t^{x_{P_x}}}{J_{nl}}.$$

Полная высота волны на поверхности, обработанной с модулированной подачей резцом с механическим креплением режущей пластины, равна

$$\vec{W} = \vec{W}_1 + \vec{W}_2.$$

Волнограммы поверхностей, обработанных подрезно-проходным резцом с механическим креплением пластины твердого сплава, представлены на рисунке 5.

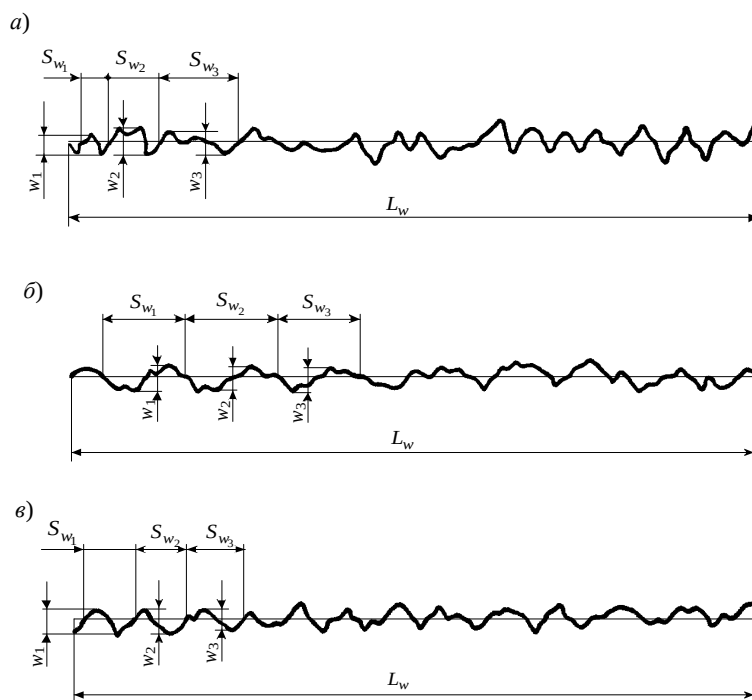


Рис. 5. Волнограммы поверхностей заготовок из стали 40ХН, обработанных подрезно-проходным резцом с постоянной и модулированной подачей ($v = 120$ м/мин; $t = 1$ мм)

а – $S_o = 0,32$ мм/об; б – $S_{o_{min}} = 0,24$ мм/об; $S_{o_{max}} = 0,4$ мм/об; $l_1 = 0,8$ мм;

в – $S_{o_{min}} = 0,24$ мм/об; $S_{o_{max}} = 0,4$ мм/об; $l_1 = 0,4$ мм

Анализ представленных волнограмм показал, что образование поперечной волнистости связано с явлением затягивания резца в металл, которое возникает вследствие большого значения главного угла в плане ϕ (обработка велась резцом с $\phi = 95^\circ$) и податливости узла крепления пластины твердого сплава. Это приводит к тому, что шероховатость выступа волны значительно меньше шероховатости впадины, образованной на большей подаче (поверхность выступа тем «чище», чем она ближе к вершине). Кроме этого, радиус выступа значительно больше радиуса впадины.

При уменьшении длины обработки l_1 , на которой осуществляется изменение подачи между ее верхним и нижним пиковыми значениями, уменьшается расстояние между смежными выступами волны.

Для значений l_1 , близких к среднему значению подачи на оборот S_o , волнистость фактически переходит в шероховатость, образованную неровностями с шагом между средними выступами, равным $2l_1$.

Форма и размеры неровностей при этом определяются параметрами модулированного изменения подачи $S_{o_{min}}$, $S_{o_{max}}$, l_1 . Задавая различные сочетания указанных параметров, легко получить регулярный профиль обрабатываемой поверхности как по высоте неровностей, так и по их форме.

Закключение. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что требуемые законы изменения параметров рельефа поверхности под газотермическое напыление могут быть получены на токарных станках с ЧПУ путем линейного изменения подачи в функции пути. Реализация функции модулированного изменения подачи позволяет получить на обрабатываемой под покрытие поверхности поперечную волнистость, параметры которой определяются размахом изменения подачи между ее пиковыми значениями, длиной пути разгона (замедления) и жесткостью технологической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скворцов, К.Ф. Подготовка поверхностей деталей для нанесения покрытий / К.Ф. Скворцов. – М.: Машиностроение, 1980. – 64 с.
2. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Машиностроение, 1992. – 432 с.
3. Каштальян, И.А. Математические модели и алгоритмы управления нестационарными процессами формообразования на станках с ЧПУ / И.А. Каштальян // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 6. – С. 18–24.
4. Каштальян, И.А. Формирование микрорельефа поверхности при нестационарном резании на токарных гибких производственных модулях / И.А. Каштальян // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2003. – № 1. – С. 52–57.
5. Маталин, А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
6. Лоповок, Т.С. Волнистость механически обработанных поверхностей / Т.С. Лоповок // Стандарты и качество. – 1974. – № 3. – С. 48–51.

Поступила 04.03.2014

THE FORMING OF MACHINE PARTS WORKING SURFACES RELIEF FOR GAS-THERMAL SPRAYING

I. KASHTALYAN

The method of machine parts external and internal surfaces relief forming for gas-thermal spraying on lathes with numerical program control by the linear and modulated change of the feed in the function of path is considered. The mathematical models and algorithm of feed control are presented. The functions, that establish interrelation of control action parameters and parameters of machined surfaces roughness and waviness, are sited.

УДК 621.928; 621.926

**НОВОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ
ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

д-р техн. наук, проф. Л.А. СИВАЧЕНКО; Н.В. КУРОЧКИН
(Белорусско-Российский университет, Могилев);
канд. техн. наук, доц. М.А. КИРКОР; Р.А. БОНДАРЕВ
(Могилевский государственный университет продовольствия);
Т.Л. СИВАЧЕНКО

(Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, Россия)

Рассматривается новое технологическое оборудование для комплексной переработки пищевого сырья растительного происхождения. Приведена информация о новых образцах технологического оборудования для измельчения, классификации и смешивания растительного сырья; дана оценка перспектив технического использования и рекомендаций по применению их в различных отраслях перерабатывающей промышленности. Исходя из феноменологической оценки стадий переработки сырья растительного происхождения предлагается активизировать технологическую переработку на основе совершенствования механизмов воздействия на обрабатываемую среду. Это направление базируется на адаптивных методах организации рабочего процесса и повышения энергонапряженности оборудования.

Введение. В настоящее время развитие пищевой промышленности стимулирует развитие направления производства ингредиентов, концентратов, добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств, быстрорастворимых продуктов [1]. Отечественная пищевая промышленность имеет большой опыт производства данных видов продукции, однако бурная динамика развития этого направления в мировом масштабе требует создания нового технологического оборудования, что определило цель выполненных работ. Рынок пищевых продуктов испытывает острую потребность в производстве натуральных пищевых добавок, соответствующих международным стандартам качества продуктов питания. Натуральные пищевые добавки представлены, как правило, в виде тонкодисперсных систем – порошков или паст. Порошкообразная форма пищевых ингредиентов имеет ряд преимуществ, таких как удобство хранения и транспортировки, интенсивное растворение, удобство дозировки и купажирования; кроме того, пищевые порошки менее подвержены химико-биологическим преобразованиям по сравнению с эмульсиями, растворами и пастами. К недостаткам порошков можно отнести дополнительные затраты энергии на сушку продукта, жесткий контроль граничного размера частиц в большинстве технологий, высокие адгезионные свойства, пожаро- и взрывоопасность.

Пастообразные продукты представляют собой вязкую тонкоизмельченную массу. Они получили широкое распространение в консервной промышленности в качестве готового продукта, а также во многих пищевых технологиях в качестве полуфабрикатов. К преимуществам пищевых паст можно отнести простоту проведения процесса, исключение процесса сушки, что позволяет сохранить в продукте витамины и биологически активные вещества. Недостатками являются сложность хранения, так как влажная среда создает благоприятные условия для развития бактерий, применение процесса пастеризации, деаэрации, меньший срок хранения по сравнению с порошками.

Таким образом, и пищевые пасты, и тонкодисперсные пищевые порошки обладают как достоинствами, так и недостатками, применение того или иного вида пищевых добавок обусловлено технологией производства конечного продукта, оборудованием, сырьевыми ресурсами.

Обобщив технологии получения пищевых добавок по виду исходного сырья и не заостряя внимание на специфике производства пищевых добавок, можно выделить несколько групп машин и аппаратов. Подготовительные операции – мойка, очистка, инспекция, отделение ферромагнитных и минеральных примесей, упаковка – обладают широким спектром конструкций и видов технологических машин и аппаратов, которые должным образом справляются с поставленной задачей. Однако такие процессы, как измельчение, грохочение, гомогенизация, классификация, смешение, имеют серьезный задел для разработки новых, высокоэффективных образцов оборудования.

Современные технологии производства продуктов питания предъявляют жесткие требования к степени дисперсности и максимальному размеру частиц. Практика использования пищевых порошков показывает, что требуемым является граничный размер частиц порошка в интервале 15...100 мкм [1]. Однако существуют и специфические технологии, что также необходимо учитывать при рассмотрении данного вопроса.

Несоблюдение требований гранулометрического состава пищевых ингредиентов приводит не только к ухудшению качества готовой продукции, необоснованному увеличению времени протекания

технологического процесса и, как следствие, к высоким энергозатратам, но и сказывается на сроке хранения порошков. Доказано, что у частиц одного и того же продукта размером 250 мкм и более по отношению к размерам 50 мкм и менее резко возрастает скорость увлажнения за счет пористости материала, что усугубляет процесс хранения и приводит к порче и потере качества товара [1].

Так как ни процесс измельчения, ни процесс сушки не позволяет получить в полной мере продукт требуемого гранулометрического состава, то для контроля размера частиц пищевых порошков применяется процесс классификации.

Для пищевых паст размер частиц также является ключевым моментом технологии производства. Известно, что для получения оптимальных показателей качества, в частности цвета, а также для предотвращения проявления пороков паст рекомендуется представлять продукт в виде массы с размером частиц 20...30 мкм [2]. В отличие от процесса получения порошков, при производстве паст вместо классификации применяется процесс гомогенизации, как правило, совмещенный с процессом диаэрации.

Для расширения информации о технической базе оборудования для комплексной переработки материалов пищевого применения представим некоторые образцы оборудования, разработанные нами и обладающие необходимой новизной и эффективностью практического применения. Часть из представленного оборудования уже используется в промышленности, другая находится в стадии лабораторных исследований, что, однако, дает нам право представить эти разработки для критической оценки специалистами, тем более что часть из них осуществляется в других отраслях.

В качестве одного из главных критериев их отбора явилось стремление минимизировать эксплуатационные издержки при максимальном сохранении потенциала пищевых материалов, а также получение готового продукта, отвечающего стандартам качества.

Аппаратурное оформление процессов измельчения, классификации в пищевой промышленности представлено широким спектром конструкций машин, причем предложенные конструкции имеют ряд конструктивных преимуществ по сравнению с традиционно применяемыми агрегатами.

Основная часть. Комплексная переработка пищевых процессов основывается на проведении целого ряда взаимосвязанных механических, термических и химических взаимодействий между исходными компонентами. Их эффективное протекание требует учета множества закономерностей и свойств обрабатываемых материалов. В качестве основной гипотезы примем адаптивные методы переработки дисперсных материалов и сред. Суть его сводится к «взаимопониманию» между перерабатываемой средой и рабочими агрегатами, которые оперативно изменяют свои характеристики по мере преобразования структуры пищевых продуктов.

Эта концепция сводится к созданию оборудования с рабочими органами, которые обладают избыточной деформационной способностью или имеют дополнительные степени свободы движения. К первым можно отнести пружинные аппараты многоцелевого назначения, ко вторым – рабочее оборудование на основе многошарнирных элементов.

Особо следует отметить адаптивный механизм реализации переработки материалов при проведении аэродинамических и гидромеханических процессов. В этом случае многофазные потоки материалов организуются и управляются таким образом, чтобы максимально улучшить процесс переработки с минимизацией негативных эффектов, например, адгезионных и электростатических сил, застойных зон, ненужных турбулентностей и др.

Ниже представлены новые технологические агрегаты, основанные на изложенных принципах, предназначенные для использования в различных стадиях переработки пищевых продуктов.

Дробилки ударного действия. С целью дальнейшего совершенствования молотковых дробилок предлагается несколько конструктивных решений этих машин: во-первых, для управления процессом измельчения ротор целесообразно устанавливать под углом и таким образом изменять характер движения материала в рабочей камере, совмещая достоинства дробилок с горизонтальными и вертикальными валами; во-вторых, выполнение бильной системы из отдельных секций, разделенных между собой свободными зонами; в-третьих, целесообразна установка между секциями бильной системы расширительных камер.

Предложенная конструкция (рис. 1) имеет между секциями бильной системы в корпусе так называемые расширительные камеры, которые способствуют снижению окружной скорости потока материала, тем самым увеличивая эффективность работы последующей секции. В первом случае расширительная камера представляет собой вытянутый цилиндрический корпус, имеющий в сечении овальную форму, во втором – корпус представляет собой два усеченных конуса соединенных между собой большими основаниями так, что нижние их основания расположены на одной линии с минимальным расстоянием от концов ударных элементов, а верхняя часть конусов образует расширительную камеру. Также конструкция расширительной камеры позволяет выводить мелкую фракцию материала, установив к ней вытяжную систему. Наклон корпуса измельчителя в сочетании с расширительной камерой обеспечивает

управляемое движение материала и более высокую технологическую и энергетическую эффективность работы дробилки [3]. Выполнение ударных элементов в виде ножей или фрез дает возможность производить переработку волокнистых и пленочных материалов, растительного сырья, пластмасс и др. [3].

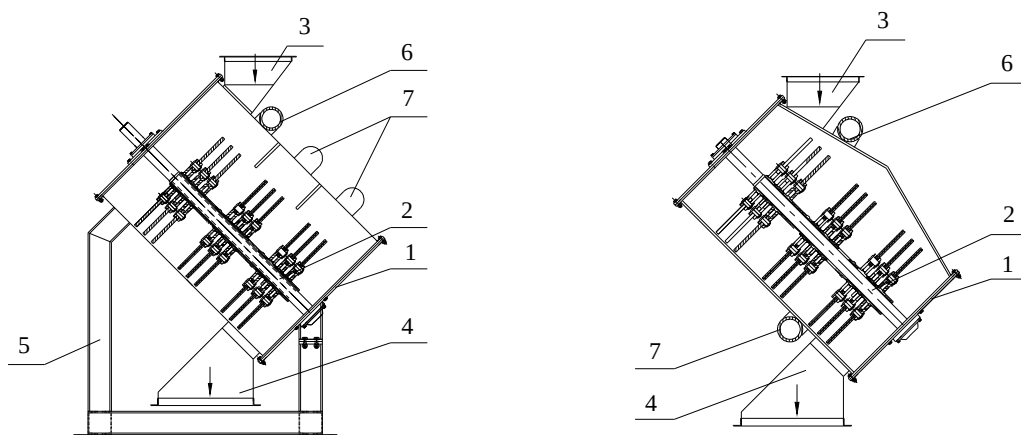


Рис. 1. Дробилка с наклонным ротором:

1 – корпус; 2 – рабочий орган; 3,4 – устройства для загрузки и выгрузки;
5 – рама; 6 – патрубок для ввода дополнительных материалов; 7 – патрубки для вывода мелкой фракции

Данные агрегаты могут применяться для измельчения сырья растительного происхождения (злаки, сахар растительный, какао, кофе и т.д.), проявляющего хрупкие свойства.

Крупность исходных кусков материала желательна не более 50...100 мм, абразивность – не выше средней. При этом крупность частиц в готовом продукте может достигать сотен микрон и даже менее, при производительности аппаратов от 0,1 до 20 тонн в час.

Пружинный смеситель-диспергатор. Предлагаемая конструкция агрегата предназначена для смешивания, помола и активации компонентов. Основу конструкции составляет дугообразно изогнутый вращающийся пружинный рабочий орган. Механизм его воздействия на частицы обрабатываемого материала приведен на рисунке 4.

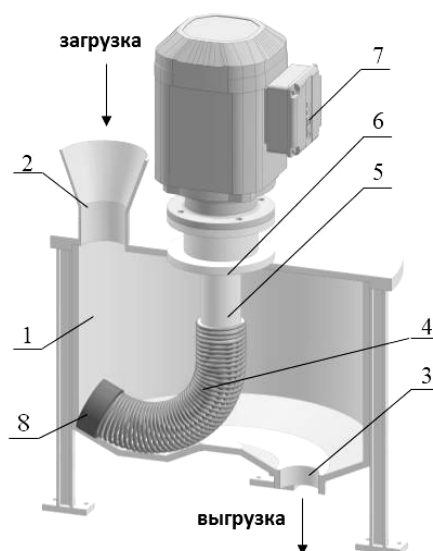


Рис. 2. Смеситель-диспергатор

Смеситель-диспергатор содержит камеру 1 для обработки материала, устройство 2 для загрузки и устройство 3 для выгрузки материала, рабочий орган 4 в виде изогнутой винтовой спирали, один конец которой закреплен на валу 5 опоры 6, на которой установлен приводной электродвигатель 7. Свободный конец спирали 4 посредством оси 8, выполненной на узле крепления 9, установлен в подшипнике 10 опорного ролика 11, имеющего бандаж 12.

Пружинный смеситель-диспергатор (см. рис. 2) предназначен для обработки порошковых составов и жидкотекучих композиций.

Рабочий процесс смесителя-диспергатора осуществляется следующим образом. Камера 1 для обработки материала через загрузочное устройство 2 заполняется исходными компонентами. Включается приводной электродвигатель 7 и через вал 5 опоры 6 приводит во вращение спиральный рабочий орган 4, который через ось 8 опирается на подшипник опорного ролика. При вращении рабочего органа 4 частицы исходного материала попадают в клиновидные пространства, образованные смежными витками, и интенсивно разрушаются. Одновременно рабочий орган в силу возникающих реактивных моментов от взаимодействия с рабочей средой получает поворотное вращательное движение в плоскости своей центральной оси относительно оси привода. При этом опорный ролик перекачивается по поверхности рабочей камеры, а рабочий орган 4 совершает некоторое количество полных вращений по всему рабочему объему камеры 1. Это позволяет производить качественную обработку всего объема загруженного материала. Обработанный до требуемых кондиций и готовый для последующего использования продукт удаляется из аппарата через устройство 3 для выгрузки.

Представленная конструкция также может использоваться при производстве пищевых паст, совмещая процесс измельчения (протирания) и гомогенизации. Отдельного внимания заслуживает возможность применения данного диспергатора в технологии получения шоколадных масс. Применение пружинного диспергатора-смесителя позволяет, во-первых, совместить в себе два технологических процесса, во-вторых, получить более однородную консистенцию за счет диспергирования уже на стадии смешения.

Штифтовый измельчитель. Установка подготовки зерна для вскармливания животным по методу иглопротыкания (рис. 3) содержит установленные в корпусе 1 и вращающиеся навстречу друг другу щеточные валки 2, 3. Исходное зерно поступает в зону обработки через патрубок 4, а удаляется после обработки через выгрузочный лоток 5. Для исключения забивания щеток зерновым материалом в конструкции предусмотрены очистительные устройства 6, 7.

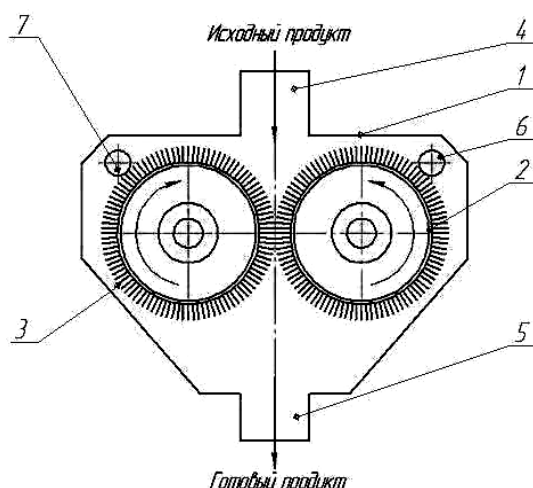


Рис. 3. Валковый измельчитель:

1 – корпус; 2, 3 – щеточные валки; 4 – патрубок подачи продукта; 5 – выгрузочный лоток

Создание оборудования, использующего метод иглопротыкания, являющегося конкурентным для технологии получения зерна, дает возможность отойти от использования при подготовке комбикормов молотковой дробилки и активировать процессы пищеварения у животных при минимальной степени изменения сырья [4].

Технологическая операция тонкого разделения в большинстве случаев производится на таком виде оборудования, как классификатор.

Механические классификаторы. Существует способ грохочения с помощью просеивающей поверхности, выполненной в виде упругих элементов, которые совершают дополнительные колебания в направлении, перпендикулярном к движению материала. Эти колебания позволяют улучшить прохождение материала через просеивающую поверхность, увеличивая при этом удельную производительность поверхности грохочения. При колебании пружинного рабочего органа динамически изменяется размер отверстий и устраняется эффект забивания и залипания просеивающей поверхности материалом с влажностью более 3 % (рис. 4) [5].

Просеивающей поверхностью грохота являются пружины, связанные механизмом колебаний. Подлежащий разделению материал загружается в полость пружин, где под действием вибрации мелкая

(подрешетная) фракция просыпается через зазоры между витками, а крупная (надрешетная) вываливается через нижние отверстия полости пружин. Граница разделения регулируется изменением зазора между витками и находится в диапазоне 0,5...5,0 мм. Агрегат способен работать на материале влажностью 3...8 % с эффективностью разделения 85...96 %. Его производительность составляет 5...50 тонн в час, а энергоемкость – 0,08...0,12 кВт·ч/т.

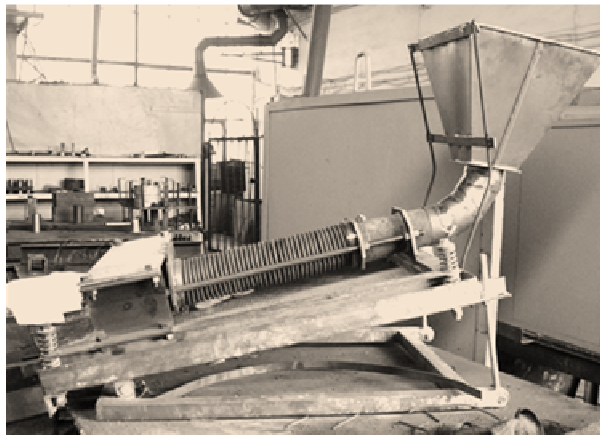


Рис. 4. Промышленный образец пружинного грохота

Применение данного агрегата целесообразно для разделения материалов растительного происхождения с размером частиц от 2 мм до 200 мкм. Также может использоваться как грубая очистка с возвратом на повторную обработку.

При работе с мелкодисперсным материалом большее распространение получили аэродинамические классификаторы. В аэродинамических классификаторах процесс разделения происходит за счет противопоставления массовых сил (сила тяжести, сила инерции) силам аэродинамического сопротивления. С точки зрения соотношения массовых и аэродинамических сил среди аэродинамических классификаторов наибольшим потенциалом обладают центробежные аэродинамические классификаторы. Данная гипотеза подтверждается научными исследованиями многих авторов.

Наибольшее применение в отрасли производства пищевых добавок получили роторные классификаторы. При вращении ротора продукт в зависимости от массы распределяется по радиальному направлению ротора, при этом более тяжелые частицы стремятся к большему радиусу, более мелкие – к меньшему. Это обеспечивает тонкое распределение продукта по поверхности ротора.

Удаление отделенной тонкой фракции происходит путем уноса частиц восходящим аэродинамическим потоком. Положительным фактором является возможность подачи воздушного потока по определенным зонам (по радиусам ротора), что положительно сказывается на процессе. Совокупность конструктивных особенностей роторных классификаторов дает возможность более тонкого разделения смеси с граничным размером $\delta_{гр} = 15...500$ мкм, что выгодно выделяет данный тип оборудования среди аналогов. Точная регулировка дает возможность разделения многокомпонентной порошковой смеси, последовательного выделения нескольких фракций путем изменения частоты вращения ротора.

Общий принцип действия роторных классификаторов сходен. Они, как правило, состоят из рабочей камеры, ротора с приводом, подачи и выгрузкой продукта с помощью аэродинамического потока.

На базе кафедры прикладной механики Могилевского государственного университета продовольствия была разработана конструкция роторного центробежного классификатора для разделения пищевых порошков (рис. 5).

Основным рабочим органом представленного классификатора является ротор, представляющий собой набор дисков с радиальными лопатками [7]. Данный образец имеет довольно высокие показатели качества классификации в интервале размеров от 50 до 350 мкм, отличаются относительно невысокими гидравлическими сопротивлениями, может успешно применяться для разделения пищевых порошков в указанных интервалах.

Результатом дальнейших научных исследований и изучения процесса разделения применительно к пищевым материалам может являться центробежный роторный классификатор с криволинейными лопатками. Основным отличием данной конструкции является рабочий орган [6] (рис. 5, б), который согласно экспериментальным исследованиям позволяет существенно снизить порог разделения 15 до 50 мкм. Поставленная задача достигается за счет уменьшения возможности агрегатирования порошков путем их радиального распределения по поверхности диска совместно с распределением по секторам. Кроме этого

в данной конструкции приняты меры для стабилизации аэродинамического потока в межлопаточном пространстве ротора, заключающейся в применении криволинейных лопаток в междисковом пространстве ротора. Данное техническое решение способствует образованию квазиламинарного режима течения газозвеси по ступеням ротора.

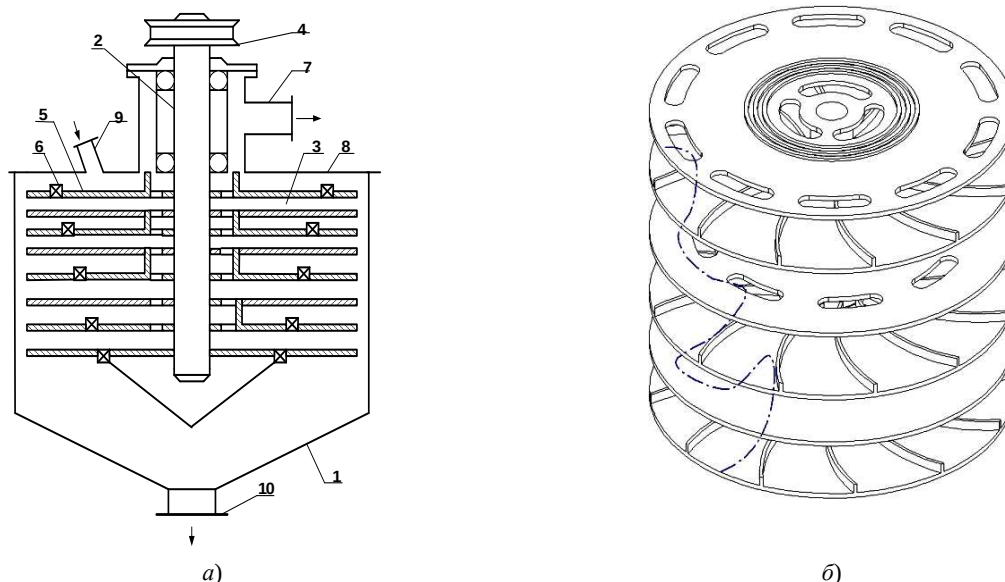


Рис. 5. Роторный центробежный классификатор для разделения пищевых порошков:
 а – классификатор с радиальными лопатками; б – ротор с криволинейными лопатками;
 1 – корпус; 2 – приводной вал; 3 – ротор; 4 – шкив привода; 5 – верхний диск;
 6 – окно; 7 – патрубок вывода мелкой фракции; 8 – крышка;
 9 – патрубок ввода исходного продукта; 10 – патрубок вывода крупной фракции

Принцип работы классификатора. Исходный продукт направляется на верхний диск рабочего органа, где под действием инерциальной силы более тяжелые частицы отесняются к стенке аппарата, а более легкие занимают положение, близкое к всасывающему потоку воздуха. Целевая фракция уносится вместе с воздушным потоком из рабочей камеры и осаждается в циклоне. Грубый продукт осаждается в корпусе классификатора и удаляется из аппарата под действием силы тяжести. Основное отличие данного аппарата заключается в использовании ротора с криволинейными лопатками. Данное техническое решение положительно влияет на качество разделения роторного центробежного классификатора, повышает его коэффициент полезного действия и достигается более четкая граница разделения.

Заключение. Представленные материалы являются частью исследований, которые проводились рядом организаций. Они не связаны единичными научно-техническими программами, поэтому не могут претендовать на завершенность. Нами предпринята попытка объединить их и дать оценку перспектив и возможностей использования в пищевой промышленности:

- *молотковая дробилка* является универсальным агрегатом для грубого и тонкого измельчения растительных и минеральных материалов производительностью от 0,1 до 20 т/ч и позволяет измельчить продукт до крупности 1...0,5 и даже 0,2 мм. Используется при получении известняковой крупки, измельчении зерна на комбикорм, переработки хлебобулочных изделий;

- *грохот пружинный* является новым технологическим агрегатом для пищевой промышленности. Он отличается высокой виброактивностью просеивающих поверхностей, что позволяет производить эффективное разделение материалов, в том числе и влажных, крупностью от 0,2 до 5 мм. Возможно установка пружинных рабочих органов в сушильные камеры и совмещение процессов сушки и грохочения;

- *пружинные мельницы, смесители и диспергаторы* имеют определенные технологические особенности, что позволят использовать их для помола различных материалов, применять при получении пищевых добавок и красителей, приготовлении кондитерских масс, различных смесей и компонентов, производстве мясокостной муки и т.д. Производительность пружинных агрегатов составляет от 0,05...0,7 т/ч. Эти машины наиболее эффективны для переработки жидкотекучих продуктов;

- *штифтовые измельчители* являются принципиально новым видом оборудования, их технологические возможности еще предстоит выявить. Первые наработки показывают их эффективность и потенциал, что может быть успешно реализовано в пищевой промышленности.

- центробежные роторные классификаторы являются высокоэффективными аппаратами для разделения пищевых полидисперсных порошков для отделения частиц продукта в интервале размеров от 5 до 350 мкм с производительностью по продукту от 0,05 до 0,5 т/ч. Они обеспечивают четкую границу разделения в заявленном диапазоне, что особенно актуально для пищевых порошков, максимальный размер частиц которых жестко регламентируется нормативными документами. В зависимости от специфики производства классификатор может быть выполнен в стандартном варианте, применяемом для сухих малоадгезионных продуктов, а также в варианте, обеспечивающем разделение высокоадгезионных, склонных к слипанию влажных и трудноразделимых продуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарев, Р.А. Анализ методов классификации тонкодисперсных порошков / Р.А. Бондарев, И.Н. Никитин, М.А. Киркор // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. VIII Междунар. науч. конф. студ. и аспирантов: в 2-х ч., Могилев, 26–27 апр., 2012 г. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2012. – Ч. 2. – С. 75.
2. Нечаев, А.П. Технологии пищевых производств / А.П. Нечаев, И.С. Шуб. – М.: Колос С, 2005. – 768 с.
3. Харкевич, В.Г. Измельчение высушенных хлебобулочных изделий в установках ударного действия с многозвенным рабочим органом: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.18.12 / В.Г. Харкевич; Мог. гос. ун-т прод. – Могилев, 2010. – 23 с.
4. Сиваченко, Т.Л. Создание волокнисто-стержневых аппаратов для получения наноразмерных композиций / Т.Л. Сиваченко // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: в 3-х ч.: сб. тр. междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 13–15 апр. 2010 г. / Белгор. гос. техн. ун-т; редкол.: В.С. Лесовик [и др.]. – Белгород, 2010. – Ч. 3. – С. 220–228.
5. Сиваченко, Л.А. Вибрационные пружинные грохоты / Л.А. Сиваченко, О.В. Голушкова. – Могилев: БРУ, 2006. – 42 с.
6. Центробежный классификатор для получения тонкодисперсных порошков: МПК (2009) B07B7/083; B01D45/00 / М.А. Киркор, Р.А. Бондарев; заявитель Мог. гос. ун-т. прод. – № а 20121640; заявл. 28.11.2012.
7. Центробежный классификатор для разделения полидисперсных материалов: пат. 7793 Респ. Беларусь, МПК7 B07 B7/083 / В.А. Шуляк, М.А. Киркор; заявитель Мог. гос. ун-т. прод. – № а 20020944; заявл. 26.11.2002 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 1. – С. 58–59.

Поступила 10.02.2014

NEW TECHNOLOGY EQUIPMENT FOR COMPREHENSIVE FOOD PROCESSING RAW PLANT ORIGIN

L. SIVACHENKO, N. KUROCHKIN, M. KRIKOR, R BONDAREV, T. SIVACHENKO

Currently, the development of food industry development direction stimulates production of ingredients, concentrates and additives, flavorings and processing aids, instant products. Domestic food industry has deep experience in the production of these products, but the dynamics of turbulent development in this direction globally requires the creation of new technological equipment that is the aim of the work performed. On the skeleton of the phenomenological evaluation stages of processing raw materials of vegetable origin are encouraged to strengthen technological processing by improving mechanisms to influence the processing medium. This direction is based on adaptive methods of workflow and increase power density equipment. The article presents information about new samples of technological equipment for grinding, classification and mixing plant material, and assesses the prospects for their use and technical recommendations for their use in various process industries.

УДК 62-83

**ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА МНОГОКООРДИНАТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ДЛЯ СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ****канд. техн. наук, доц. И.В. ДАЙНЯК; Д.Г. БЕГУН; В.В. ПОЛЯКОВСКИЙ**
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Рассматривается новый подход к построению сборочного оборудования микроэлектроники, согласно которому его система перемещений конфигурируется на многокоординатных приводах и механизмах параллельной кинематики. Управление разработанной системой осуществляется на основе разработанных алгоритмов, использующих цифровую информацию, получаемую от системы технического зрения. Для предложенного механизма параллельной кинематики приведено решение прямой и обратной задач кинематики на основе математических моделей описания его топологии и кинематики. Разработана программа, позволяющая проводить пошаговое моделирование и визуализацию положения и ориентации каретки механизма в соответствии с изменяющимися на каждом шаге входными переменными параметрами. Интегрированная система многокоординатных перемещений позволяет на новой элементной базе создавать перспективное сборочное оборудование микроэлектроники с высокими показателями назначения. Приведена схема встраивания разработанной системы перемещений в оборудование и достигаемые при этом характеристики точности, скорости и ускорения рабочей каретки.

Введение. Интегрированная система многокоординатных перемещений конфигурируется как система перемещений на многокоординатных приводах и механизмах параллельной кинематики и является механо-аппаратно-программным комплексом, относящимся к классу мехатронных систем перемещений. Структурно ее можно разделить [1] на две составляющие: исполнительный механизм параллельной кинематики и многокоординатный привод, в котором управление всеми координатными двигателями происходит через специальный контроллер от программы верхнего уровня на управляющем компьютере.

Многокоординатный привод может быть построен как на параллельном сочетании некоторого количества однокоординатных управляемых двигателей по числу параллельных кинематических цепей, так и на использовании одного гибридного многокоординатного двигателя [2], замыкающего все обобщенные координаты используемого механизма параллельной кинематики. Безусловно, в прецизионных системах перемещений специального технологического сборочного оборудования, от которых требуется реализация технологических операций, связанных с перемещениями в трехмерном пространстве, предпочтительным является гибридный многокоординатный двигатель, позволяющий создавать интегрированный координатный привод и на его основе системы перемещений на механизмах параллельной кинематики с числом степеней свободы до шести включительно. Это научно-техническое направление в настоящее время очень востребовано, начинает интенсивно развиваться в разных научных и прикладных аспектах [3]. В отличие от традиционной системы многокоординатного привода, когда каждая координата представляет собой однокоординатный механо-аппаратный модуль движения со своим отдельным аппаратным интерфейсом, в разрабатываемых и используемых нами гибридных многокоординатных приводах их конструктивное исполнение, электромагнитная система и аппаратный интерфейс являются общими для всей конкретной системы перемещений. Ниже будет рассмотрена система перемещений такого типа, реализующая пространственное перемещение рабочей каретки с шестью степенями свободы.

Система перемещений на сегментном многокоординатном приводе. Разработанная многокоординатная система перемещений с шестью степенями свободы для сборочного технологического оборудования микроэлектроники представляет собой интегрированную систему, которая состоит из шестикоординатного исполнительного манипулятора с гибридной структурой (рис. 1), шести сегментных синхронных двигателей 1, 2, 3, 4, 5, 6 и шести параллельных кинематических цепей механизма параллельной кинематики, звенья которых через сферические шарниры передают управляемое движение на рабочую каретку 8. Исполнительные двигатели входят в состав координатных приводов $S_1, S_2, \dots, S_6$, согласованная работа которых обеспечивается управляющей программой контроллера в соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 1.

Контроль состояния объекта обработки, находящегося на подвижной каретке, осуществляется по результатам цифровой обработки информации от системы технического зрения (СТЗ). При этом в компьютере по разработанной программе совместно обрабатываются текущее состояние контроллера системы перемещений и результаты распознавания. В процессе выполнения технологической сборочной операции каретка с пластиной или кристаллом перемещается по трем линейным и трем угловым координатам в зависимости от команд, поступающих от контроллеров на силовые приводы. Команды в свою очередь формируются по результатам цифровой обработки информации, полученной от системы технического зрения. Как правило, в сборочном оборудовании телевизионный датчик СТЗ располагается рядом с

инструментом сборки. Это позволяет устанавливать и совмещать систему координат датчика и пространственную систему координат объекта, связанную с кареткой шестистепенного исполнительного манипулятора. Последний должен обеспечивать достаточную для распознавания ортогональность плоскости объекта и оптической оси датчика. Для управления разработанной шестикординатной системой перемещений нами предложена аппаратная конфигурация на основе двух контроллеров LSMC-х, созданных и серийно выпускаемых на предприятии «Рухсервомотор» [4].

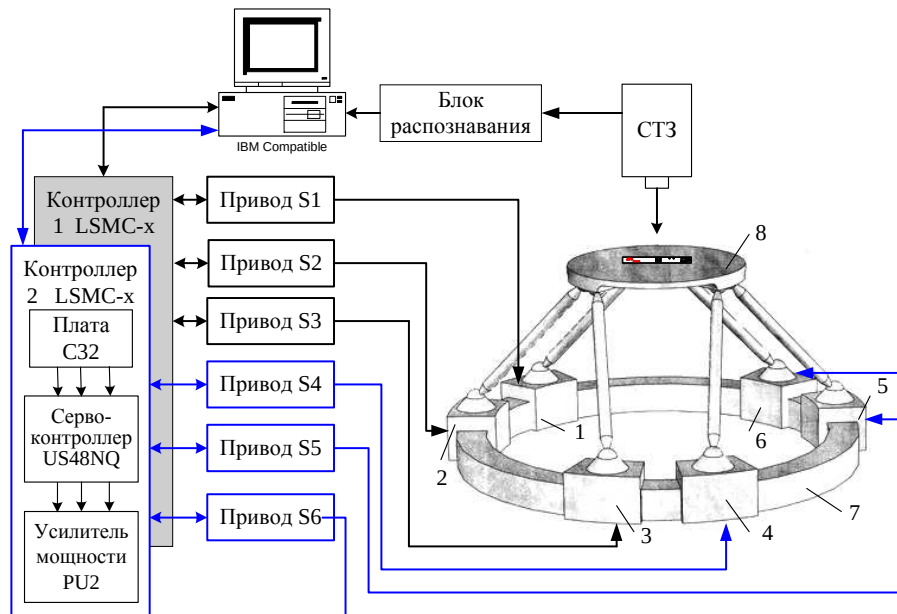


Рис. 1. Структура интегрированной системы многокоординатных перемещений:
1–6 – сегментные модули движения; 7 – кольцевой статор; 8 – рабочая каретка

Алгоритмизация математических моделей решения прямой и обратной задач кинематики для исполнительного манипулятора. В основе алгоритмов управления исполнительным манипулятором интегрированной системы перемещений лежат аналитические зависимости, связывающие кинематические характеристики задаваемых движений на каждом подвижном сегменте многокоординатного двигателя с тремя линейными x, y, z и тремя угловыми φ, θ, ψ обобщенными координатами перемещаемой каретки в трехмерном пространстве. Такие аналитические зависимости получают при решении прямой и обратной задач кинематики, для которых ранее [5] были предложены математические модели описания топологии и кинематики рассматриваемого манипулятора, обеспечивающие требуемое положение и ориентацию подвижной системы координат каретки по отношению к неподвижной системе координат статора гибридного синхронного двигателя. Как следует из принятой расчетной модели, взаимное положение этих систем координат зависит одновременно от всех кинематических связей и текущих обобщенных координат.

Разработанный алгоритм решения прямой задачи кинематики основывается на равенстве матрицы M_1 текущего кинематического состояния исполнительного механизма, записываемой в виде

$$M_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

матрице M_2 , описывающей положение и ориентацию подвижной каретки:

$$M_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \theta \cos \psi & x_0 \\ \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & -\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \sin \theta \cos \psi & y_0 \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где a_{ij} ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$) – элементы матрицы, рассчитываемые по значениям обобщенных координат привода и конструктивным параметрам механизма, которые определяются по формулам, полученным в

работе [6]; $\varphi, \theta, \psi, x_0, y_0, z_0$ – угловые и линейные независимые координаты, задающие положение и ориентацию рабочей каретки в трехмерном пространстве.

На основании условия равенства матриц M_1 и M_2 получены в явном виде формулы решения прямой задачи, состоящей в расчете текущих линейных (x_0, y_0, z_0) и угловых (φ, θ, ψ) координат рабочей каретки в системе координат статора в виде

$$\begin{aligned} x_0 &= a_{14}; \quad y_0 = a_{24}; \quad z_0 = a_{34}; \quad \sin \varphi = \frac{a_{21}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}; \quad \cos \varphi = \frac{a_{11}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}; \\ \sin \theta &= -a_{31}; \quad \cos \theta = \sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}; \quad \sin \psi = \frac{a_{32}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}; \quad \cos \psi = \frac{a_{33}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что формулы (3) обеспечивают однозначный алгоритм решения прямой задачи кинематики и полностью соответствуют требованиям реализованной системы управления.

Для решения обратной задачи кинематики методами аналитической геометрии нами получены формулы расчета координат положения подвижных сегментов 1, 2, ..., 6 в зависимости от текущего положения каретки, задаваемого координатами точек C_1, C_2, C_3 (рис. 2).

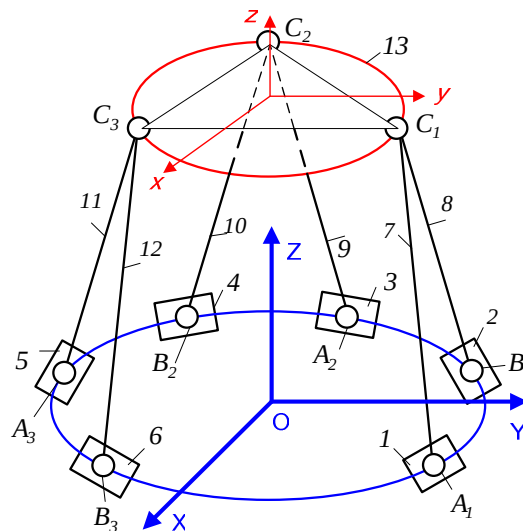


Рис. 2. Расчетная структурно-кинематическая схема исполнительного манипулятора:
1, 2, 3, 4, 5, 6 – сегменты двигателя; 7, 8, 9, 10, 11, 12 – подвижные звенья кинематических цепей; 13 – рабочая каретка

Так, например, для точек $A_1(x_1, y_1)$ и $B_1(x_2, y_2)$ формулы расчета соответствующих координат имеют вид

$$x_{1,2} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2ac}; \quad y_{1,2} = \pm \sqrt{R^2 - x_{1,2}^2}, \quad (4)$$

где a, b, c – параметры, рассчитываемые по формулам:

$$a = 4 \left(\left(x^{(C_1)} \right)^2 + \left(y^{(C_1)} \right)^2 \right); \quad b = 2Ax^{(C_1)}; \quad c = A^2 - 4 \left(y^{(C_1)} \right)^2 R^2, \quad (5)$$

где $x^{(C_1)}, y^{(C_1)}$ – координаты точки C_1 в неподвижной системе координат; A, R – конструктивные параметры механизма.

Координаты точек A_2, B_2 и A_3, B_3 определяются по формулам, аналогичным (4) и (5). При выборе решения учитываются условия бесколлизии работы подвижных элементов манипулятора.

Для моделирования прямой и обратной задачи кинематики рассматриваемого исполнительного манипулятора в среде MATLAB разработана программа интерактивной визуализации, интерфейс которой представлен на рисунке 3.

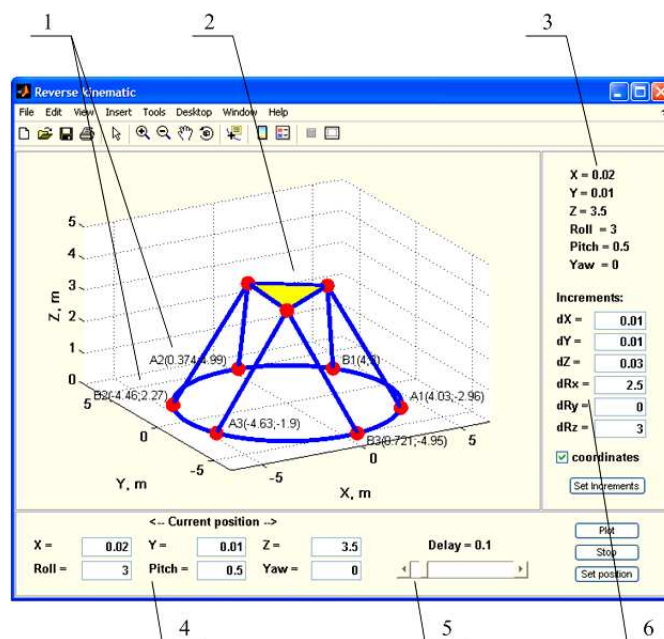


Рис. 3. Интерфейс программы моделирования решения прямой и обратной задач кинематики:
 1 – текущие координаты (x, y) подвижных сегментов привода; 2 – текущее состояние пространственного механизма;
 3 – текущие координаты положения и ориентации каретки; 4 – задаваемые координаты положения и ориентации каретки;
 5 – задержка пошаговой визуализации; 6 – задаваемые инкрементные приращения по координатам положения и ориентации каретки

Разработанная программа позволяет проводить пошаговое моделирование и визуализацию положения и ориентации каретки механизма в соответствии с изменяющимися на каждом шаге входными переменными параметрами. По результатам моделирования исполнительного манипулятора системы перемещений в части рабочей области с координатной калибровкой по точности и скорости получены следующие ее выходные характеристики: диапазон перемещений по координатам x и y от 0 до ± 120 мм, по z от 0 до ± 80 мм; точность по линейным координатам x , y , z составляет $\pm 0,1 \dots \pm 0,3$ мкм; точность по угловым координатам φ , θ , ψ составляет $\pm 20 \dots \pm 30$ угл. с; скорость по линейным координатам – до 2 м/с, ускорение – до 5 м/с².

Встраивание интегрированной системы перемещений в сборочное оборудование. Разработанная интегрированная система многокоординатных перемещений позволяет на совершенно новой элементной базе создавать перспективное специальное технологическое сборочное оборудование микроэлектроники со значительно более высокими показателями назначения, такими как точность и производительность. Проведенные теоретические исследования и результаты компьютерного моделирования точности и рабочих областей исполнительного манипулятора показали, что предложенная система перемещений по точности и быстродействию не менее чем в 2...3 раза превосходит существующие. Система перемещений, разработанная как мехатронный узел со своим аппаратно-программным интерфейсом, может быть легко встроена в любое сборочное оборудование взамен координатных систем на ЛШД. Укрупненная схема встраивания в сборочное оборудование показана на рисунке 4.

Характеристики диапазона перемещений, точности, скорости, ускорения разработанной системы перемещений приведены в таблице.

Характеристики интегрированной системы перемещений

Ось	Диапазон, мм	Точность, мкм	Скорость, м/с	Ускорение, м/с ²
X	± 100	0,3...0,5	1...2	20...50
Y	± 100	0,3...0,5	1...2	20...50
Z	± 150	0,1...0,2	0,5...1,0	10...20
Ось	Диапазон, град	Точность, с	Скорость, град/с	Ускорение, град/с ²
φ	± 360	1...2	500...1000	10 000...30 000
θ	± 20	0,1...0,2	400...800	5 000...10 000
ψ	± 20	0,1...0,2	400...800	5 000...10 000

Представленные характеристики (см. таблицу) полностью удовлетворяют не только текущим, но и перспективным требованиям к системам координатных перемещений сборочного и отдельных видов оптико-механического оборудования. Достигаемые показатели точности выше, чем у аналогов, обеспечиваются за счет кинематической редукции в самом механизме параллельной кинематики, при этом скорости перемещений каретки редуцируются с обратным коэффициентом. Таким образом, при прочих равных условиях скорости перемещения по координатам могут быть выше в 2 раза, чем непосредственные скорости подвижных сегментов многокоординатного привода.

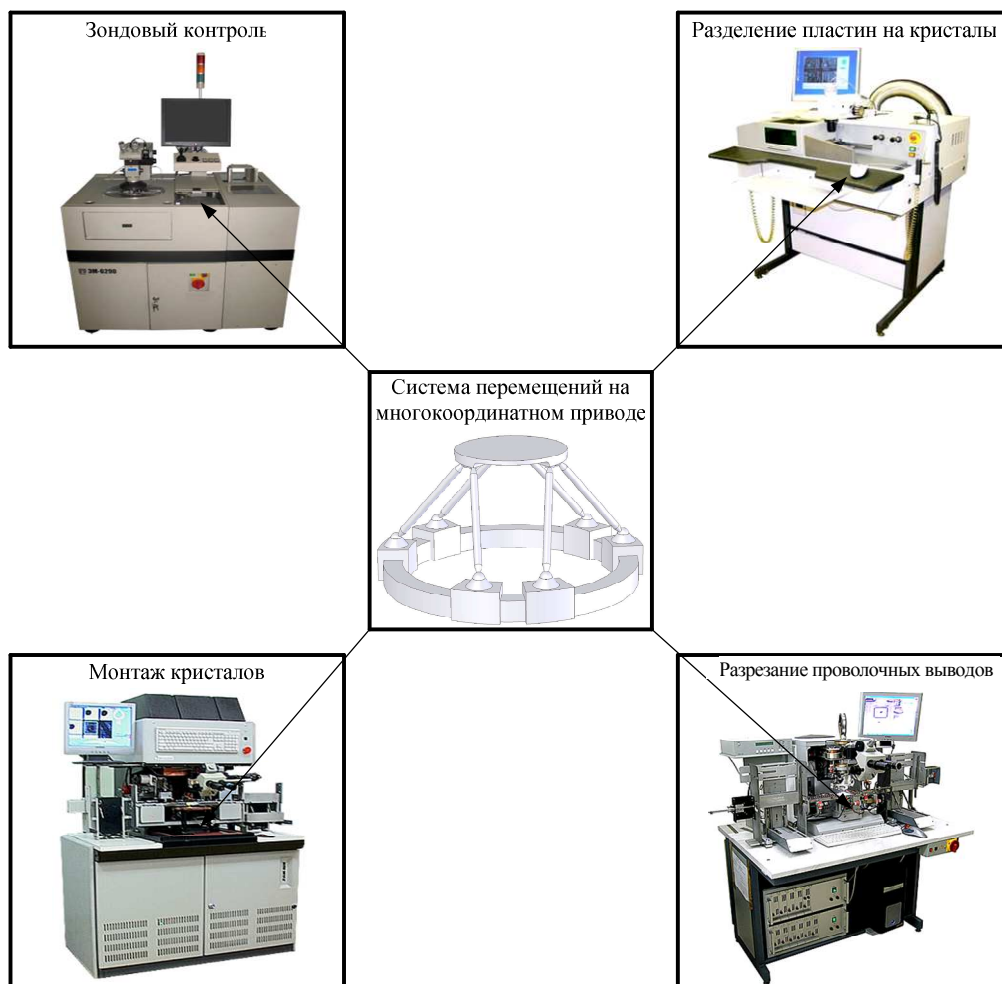


Рис. 4. Схема встраивания системы перемещений на многокоординатном приводе в сборочное оборудование

Интегрированная система многокоординатных перемещений на кольцевом сегментном приводе может быть также использована в проекционных системах фотолитографического оборудования для перемещения оправок с линзами. В конструкцию проекционной системы может быть встроен механизм стабилизации координат позиционирования оптических элементов, позволяющий подстраивать их при сборке и изменении геометрии проекционной системы и оптических элементов вследствие старения. В результате специальные адаптивные механизмы позиционирования позволят поддерживать на требуемом уровне показатели назначения. При этом для каждого подстраиваемого оптического элемента адаптивный механизм позиционирования предлагается делать на основе исполнительных механизмов с шестью или меньшим числом степеней свободы кольцевого типа с сегментными электромагнитными модулями.

Заключение. В результате проведенного исследования предложена интегрированная система многокоординатных перемещений, основанная на гибридной компоновке исполнительного механизма манипулятора и сегментного привода прямого действия, подвижные элементы которого кинематически связаны с подвижной кареткой, обеспечивая возможность управления ее движением с шестью степенями свободы.

Для разработанного механизма аналитические алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики, полученные в явном виде при алгоритмизации математических моделей, позволяют в режиме

реального времени проводить компьютерное моделирование в среде MATLAB с интерактивной визуализацией самого механизма и отображением всех кинематических характеристик.

Алгоритмы и программное обеспечение для исполнительного механизма могут быть рекомендованы для компьютерного формирования рабочей области с требуемыми свойствами по кинематическим и точностным показателям при встраивании системы перемещений в конкретное оборудование для производства изделий микроэлектроники.

Предложенная интегрированная система перемещений на кольцевом сегментном приводе и механизме параллельной кинематики предназначена для использования в качестве базового кинематического узла при разработке как прецизионного сборочного и оптико-механического оборудования микроэлектроники, так и прецизионных станков сложной механообработки и лазерной обработки материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мехатроника / Т. Исии [и др.]. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
2. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования: моногр. / В.В. Жарский [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Е. Карповича. – Минск: Бестпринт, 2013. – 208 с.
3. Лукьянец, С.В. Моделирование гибких производственных систем и роботизированных комплексов: моногр. / С.В. Лукьянец, А.П. Пашкевич. – Минск: БГУИР, 2005. – 232 с.
4. Жарский, В.В. Системы прямого привода «Рухсервомотор» / В.В. Жарский // Оборудование: рынок, предложение, цены: промышленный журнал. – 2006. – № 02(110). – С. 90–97.
5. Литвинов, Е.А. Компьютерное моделирование прямой и обратной задачи кинематики пространственной системы перемещений с шестью степенями свободы в среде MATLAB/Simulink / Е.А. Литвинов, С.Е. Карпович, В.В. Жарский // Теоретическая и прикладная механика. – 2008. – Вып. 23. – С. 112–117.
6. Моделирование механизмов параллельной кинематики в среде MATLAB/Simulink: моногр. / С.Е. Карпович [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2013. – 153 с.

Поступила 18.04.2014

INTEGRATED SYSTEM OF MULTICOORDINATE MOVEMENTS FOR ASSEMBLY EQUIPMENT OF MICROELECTRONICS

I. DAINIAK, D. BEGUN, V. POLIAKOVSKI

The article is devoted to a new approach of construction of assembly equipment for microelectronics; according to this approach the motion system of assembly equipment is configured on multicoordinate drives and parallel kinematics mechanisms. The control of motion system is based on developed algorithms, which use the digital information from vision system. The solution of direct and inverse kinematics problem of the offered parallel kinematics mechanism is given; it is based on mathematical models, which describe its topology and kinematics. The program which allows performing the step simulation and visualization of position and orientation of mechanism carriage in accordance with the changing on each step input variable parameters was developed. The integrated system of multicoordinate movements allows creating perspective assembly equipment for microelectronics with high target characteristics on new element base. The scheme of the embedding of developed motion system into equipment was given, and achieved characteristics of accuracy, velocity and acceleration were shown.

УДК 621.924.093.048

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОРЕЖУЩИХ УСТРОЙСТВ
С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА****д-р техн. наук, проф. М.С. ХОРОЛЬСКАЯ; А.Ф. САЛЕНКО****(Кременчугский национальный университет им. Михаила Остроградского, Украина);****канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН****(Полоцкий государственный университет, Беларусь);****В.Я. НИКОЛАЙЧУК****(Винницкий национальный аграрный университет, Украина);****Т.В. ВОРОНА****(Кировоградский национальный технический университет, Украина);****Е.Е. КОЖЕВНИКОВА****(Одесская национальная морская академия, Украина)**

Исследуется влияние параметров калибрующей трубки струйно-абразивных устройств на качество процесса гидроабразивной резки ответственных деталей. Приведены результаты моделирования формирования двухфазного потока и его движения в калибрующей трубке. Определено, что протекающее изнашивание проточной части трубки имеет различную интенсивность и характер. В связи с этим возникает необходимость применения функционально-ориентированного подхода к выбору средств обеспечения требуемых геометрических параметров трубки. Уменьшение интенсивности изнашивания материала в проточной части трубки и, соответственно, поддержание её геометрических параметров возможно путем использования соответствующих защитных покрытий, толщина и физико-механические характеристики которых выбираются на основе функционально-стоимостных признаков в соответствии с интенсивностью и видом абразивной нагрузки на поверхность.

Введение. Появление и широкое использование в промышленности новых конструкционных материалов, прежде всего композитов и новых высокотехнологичных изделий, предопределяет потребность в новых методах обработки. Одним из таких методов является гидроабразивное резание.

Применение гидроабразивного резания оправдывает себя особенно там, где использование традиционных методов не дает удовлетворительного качества. Исключаются дополнительные затраты на заделку или на снижение производственного темпа. Кроме того, преимуществом этого метода выступают его чистота и экологичность. Современные системы гидроабразивного резания обеспечивают непрерывную оптимизацию производственного процесса и повышения качества в обрабатываемой промышленности. Необходимость получения высокоточных результатов обработки нуждается в постоянстве и компактности струйно-абразивного потока.

Использование гидроабразивной обработки дает возможность значительно улучшить качество обрабатываемой поверхности и производительность резания, которое вызывает необходимость в разработке новых перспективных компоновок станков для обеспечения комбинированной обработки.

Среди тенденций развития гидроабразивной обработки выделяют повышение точности обработки и эффективности оборудования. Эффективность может быть повышена за счет увеличения давления жидкости (до 600 МПа) и количества одновременно работающих головок [1]. Однако повышение рабочего давления приводит к интенсификации изнашивания систем гидрорежущего оборудования, в частности калибрующих трубок (рис. 1), что в свою очередь отражается на стоимости обработки.

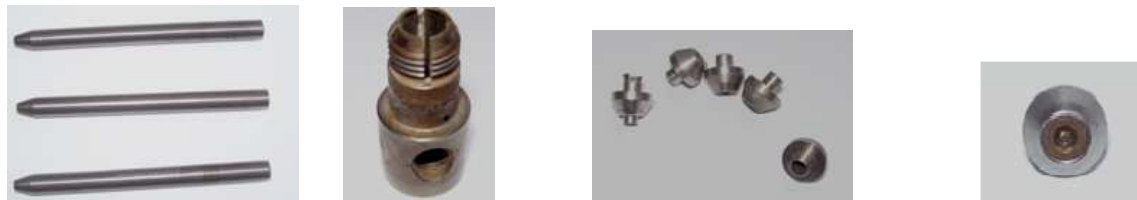


Рис. 1. Калибрующие трубки, смесительная камера и сапфировое сопло фирмы Synergicinc (поставщик – Elfihmbh, Austria)

Постановка задач исследования. Калибрующая трубка – один из наиболее важных элементов гидрорежущей системы, который влияет на технологические и экономические характеристики резания. Производственные наблюдения доказывают, что большинство функциональных отказов при реализации

гидроабразивного резания возникает именно вследствие внезапных изменений геометрии струеформирующих элементов – сопла и калибрующей трубки. Трубка подвергается постоянному изнашиванию, вследствие чего внутренний диаметр постепенно увеличивается, что определяет износ трубки. Обычно стойкость трубки составляет 10...15 часов, а ее стоимость достигает 20...50 \$ [1].

В связи с этим актуальной становится задача повышения стойкости калибрующих трубок с применением функционально-ориентированного подхода.

Для определения особенностей изнашивания калибрующей трубки проанализируем влияние движения абразивных зерен и вид разрушения.

Известно, что при движении двухфазного потока «жидкость – твердые частицы» по калибрующей трубке происходит хаотичное действие на стенки трубки отдельных абразивных частиц под разными углами атаки и с разной силой удара [2].

Абразивное разрушение поверхности трубки зависит от характера действия абразивных зерен на её поверхность. В зависимости от направления действия абразивной струи на поверхность различают следующие схемы ее действия: разрушение ударной струей, когда угол атаки $\alpha = 90^\circ$ (рис. 2, а); разрушение скользящей струей, когда $\alpha = 0$ (рис. 2, б); разрушение косой струей, когда $0 < \alpha < 90^\circ$ (рис. 2, в) [3; 4].

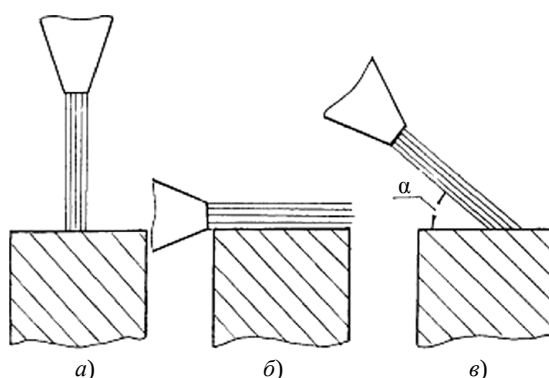


Рис. 2. Схемы действия абразивной струи на поверхность

Если на плоскую поверхность материала влияет поток твердых абразивных частиц, которые летят со скоростью v_n под углом α к поверхности, то каждая частица, ударяясь, упруго деформирует обрабатываемую поверхность и проскальзывает по ней с трением [5].

Принято, что нормальная компонента скорости v_0 вызывает только упругую деформацию материала, а касательная v_t , вступая в фрикционный контакт с поверхностью, частично или полностью гасится и выполняет работу резания. Таким образом, самая большая производительность обработки теоретически должны быть при угле атаки $\alpha = 45^\circ$, что подтверждается разными авторами [5–8].

Интенсивность изнашивания в абразивном потоке определяется как результат множественных ударов твердых частиц о поверхность изнашивания при разных углах атаки. Начальный период разрушения металла характеризуется внедрением абразивных частиц в поверхностный слой на некоторую глубину, второй – непрерывным перемещением частиц материала вдоль поверхностного слоя на некоторое расстояние, при котором происходит смещение микрообъемов металла в слое в направлении внедрения частиц и отрыв от массива [9].

При внедрении абразивных частиц в поверхностный слой металла в условиях свободного удара происходит деформация приконтактной зоны, вследствие чего в этом слое возникает сложное неоднородное напряженно-деформированное поле со сменной границей. Напряжение и деформации, которые возникают при внедрении абразивных частиц в металл, зависят от комплекса факторов, которые характеризуют параметры потока частиц и сопротивление металла упругопластичным деформациям.

В зоне контакта будут развиваться упругие и пластические деформации, которые будут содействовать смятию металла под частицей в радиальном направлении, с последующим тангенциальным сдвигом в направлении движения этой частицы относительно поверхности.

Глубина внедрения частицы и ее тангенциальное смещение при внедрении связаны с механическими свойствами абразива и материала изнашиваемой поверхности, размерами частиц, деформацией металла. При малых углах атаки вследствие преобладания тангенциальной компоненты скорости удара основным процессом разрушения поверхностного слоя есть тангенциальное смещение микрообъемов металла в направлении внедрения, то есть микрорезания.

При углах атаки, близких к 90° , вследствие преобладания нормальной компоненты скорости механизм разрушения поверхностного слоя металла в потоке абразивных частиц приобретает полидеформационный ударный характер.

Разрушение конструкционных материалов под действием абразивных частиц в потоке жидкости носит сложный характер, может быть вязким, хрупким, полидеформационным или приобретать усталостный характер, который осложнен явлением кавитации [9].

Таким образом, параметры внутреннего профиля трубки должны обеспечить следующие условия течения процесса [2]:

- 1) минимальную толщину пограничного слоя потока внутри трубки, турбулентного слоя исходящей свободной струи, которая уменьшается в толщине и снижает взаимодействие струи со средой;
- 2) уменьшение возможности отрыва пограничного слоя струи, содействуя уменьшению возбуждения центрального течения;
- 3) уменьшение возможности кавитации, которая обеспечивает исключение образования низких давлений внутри трубки, во избежание образования следующего объединения пузырьков и разрушения трубки.

На эффективность обработки оказывает влияние не только угол встречи частиц с поверхностью, но и физико-механические свойства материала, с которым частица сталкивается.

Приведенные в работах [5–7] теоретические зависимости позволяют оценить влияние угла атаки на интенсивность изнашивания лишь качественно. Поэтому для анализа явлений, которые происходят в калибрующей трубке во время формирования жидкостно-абразивного потока, использовали программный комплекс FlowVision.

При моделировании ставилась задача выявления обусловленности эпюр нагрузки на поперечном срезе калибрующей трубки микрогеометрическими параметрами струйной эрозии, установить роль и активность волновых процессов, которые возникают в струе и совершают действие на внутренний диаметр калибрующей трубки.

Ядром пакета является блок численного решения уравнения движения жидкости в ортогональной системе координат (уравнение Навье – Стокса (1)), которое для определенных начальных и предельных условий, заданных пользователем, позволяет получить эпюры распределения скоростей и динамического давления в точке контакта струи с той или другой поверхностью:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} = f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} - \frac{v_r}{r^2} \right); \\ \frac{\partial v_\phi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_\phi}{\partial z} - \frac{v_r v_\phi}{r} = f_\phi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\phi}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} - \frac{v_\phi}{r^2} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right). \end{cases} \quad (1)$$

где f_r, f_ϕ, f_z – напряжения массовых сил вдоль соответствующих осей: r, ϕ, z ; ν – кинематическая вязкость; $\frac{\partial v_r}{\partial r}, \frac{\partial v_r}{\partial \phi}, \frac{\partial v_r}{\partial z}, \frac{\partial v_\phi}{\partial r}, \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi}, \frac{\partial v_\phi}{\partial z}, \frac{\partial v_z}{\partial r}, \frac{\partial v_z}{\partial \phi}, \frac{\partial v_z}{\partial z}$ – компоненты скоростей деформирования элементарного объема жидкости (одноименные производные описывают скорость деформации сжатия или растягивания линейных элементов выделенного объема, а разноименные – скорость изменения углов между ними); ρ – массовая плотность жидкости; v_r, v_ϕ, v_z – скорости движения элементарного объема относительно соответствующих координат.

Отысканные значения напряжений массовых сил вдоль соответствующих осей при условии неразрывности $\frac{\partial(v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + r \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$ позволяют определить массовую силу, которая действует на объем жидкости и рассматривается как

$$F = \int_W f \rho dW,$$

где W – элементарный объем.

Начальные условия определяются геометрическим профилем соплового насадка, давлением жидкости и её свойствами.

Предельные условия обуславливают натекание струи на поверхность, которая представляет внутреннюю цилиндрическую поверхность калибрующей трубки.

Массоперенос определяли по (2) исходя из уравнения Стокса, которое определяет силу сопротивления частицы в потоке:

$$F_c = \frac{18\mu\Delta w}{d_s^2}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент затраты жидкости через сопло; d_s – диаметр трубки.

Для определения параметров системы была создана трехмерная модель области свободной струи и с помощью программного пакета FlowVision определено давление и скорость в струе.

Для модельных исследований была рассмотрена задача натекания струи жидкости, истекающей из отверстия диаметром 1 мм. С целью определения давления и скорости жидкости в струе была создана и решена задача со свободной поверхностью.

Были заданы следующие физические параметры:

- начальные параметры;
- опорные величины – температура 273 К, давление 101000 Па;
- параметры модели – плотность жидкости 1000 кг/м³;
- жидкость – чистая вода;
- адаптация – сетки максимум до 2 уровня.

Заданы предельные условия для элементов: стенок, входа, выхода, а также задана степень адаптации для каждого из них. Скорость струи на входе 300 м/с.

Задана начальная сетка из 25652 ячеек, из них 21168 расчетных сгущали сетку в зоне выхода из сопла и возле поверхности натекания.

Заданы общие параметры модели и время протекания расчетов в пределах от 0 до $5 \cdot 10^{-5}$ с, расчеты стандартные. Результаты расчетов представлены в виде эпюр (рис. 3, а, б): заливка – давление в диапазоне от 0 Па до 250 МПа; скорость – изолинии, от 0 до 300 м/с [11].

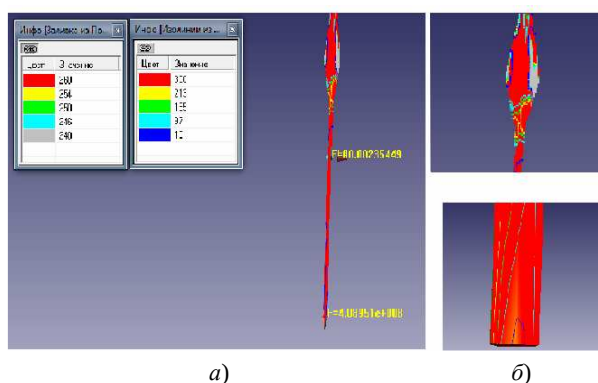


Рис. 3. Результаты моделирования взаимодействия жидкостно-абразивной смеси со стенками калибрующей трубки

Исследования показали, что наиболее нагруженными с точки зрения абразивного изнашивания являются места входа жидкостно-абразивной смеси и выхода из трубки (см. рис. 3). В этих зонах поперечное давление, вызванное волновыми процессами, максимально влияет на подвижные частицы абразива.

Представленный микроснимок кромки сопла (рис. 4) доказывает, что разрушение происходило именно на той части, которая воспринимала максимальную гидродинамическую нагрузку, вызванную обратной волной в момент натекания струи на преграду – обрабатываемую поверхность.

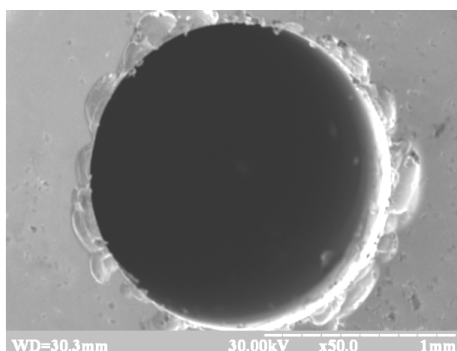


Рис. 4. Микроснимок изношенной кромки трубки

Итак, картина повреждения трубки отвечает смоделированным параметрам эпюры давления как в продольном, так и поперечном сечении соплового канала. Полученная на рисунке 5 осциллограмма свидетельствует о периодическом росте давления на кромке сопла с амплитудой от 0 Па до 250 МПа и частотой $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, которая свидетельствует о наличии волновых процессов в самом теле струи.

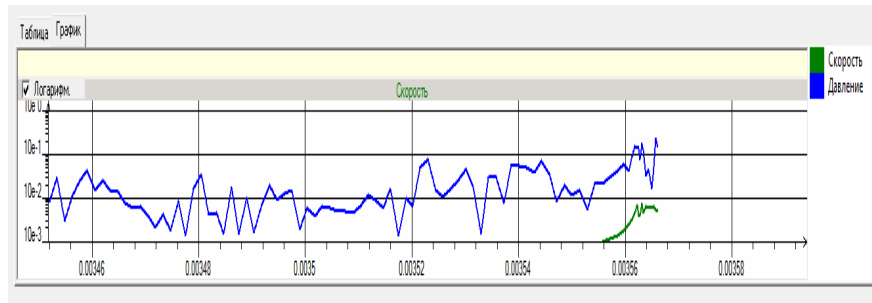


Рис. 5. Изменения скорости и давления при натекании струи на стенки калибрующей трубки

Износоустойчивость σ_w материалов калибрующих трубок при гидроабразивном изнашивании – сложная и неоднозначная функция условий взаимодействия материала с абразивными частицами и средой [3]:

$$\sigma \downarrow w = \sigma T \Pi; d K_m T; K'_\phi; v; \alpha; \chi,$$

где T – продолжительность изнашивания; Π – концентрация абразивных частиц в жидкости; d – размер частиц; K_m – коэффициент твердости, равный отношению твердости материала к твердости абразивных частиц; K'_ϕ – коэффициент, который характеризует форму частиц; v – скорость абразивных частиц в момент удара о поверхность детали; α – угол наклона вектора скорости частицы к изнашиваемой поверхности (угол атаки); χ – коэффициент, который характеризует снижение механических свойств материала в результате разупрочняющего физико-химического действия среды.

Общий объем изъятых материалов при взаимодействии гидроабразивной струи со стенками калибрующей трубки можно представить как

$$w_{\Sigma} = w_1 + w_2 = \frac{\pi \delta_n^2 n (3r - \delta_n)}{3} + \frac{\delta_n (6a + 18b)}{15} \delta_a. \quad (3)$$

Глубина лунки δ_n и ее длина δ_a в функции параметров процесса выражаются формулами:

$$\delta_n = \frac{m v_n^2}{2} \frac{R_a}{k_n z_n H B}; \quad (4)$$

$$\delta_a = \frac{m v_a^2}{2} \frac{z_n}{k_a \sigma_b R_a} - \frac{k_a T_p^2 \sigma_b R_a}{2 m z_n},$$

где m – масса абразивных частиц; v_n, v_a – нормальная и тангенциальная составляющая скорости удара частицы с обрабатываемой поверхностью; $R_a, H B, \sigma_b$ – параметры шероховатости, твердости и прочности поверхности; z_n – зернистость абразивных частиц; T_p – постоянная, которая учитывает инерционность процесса микрорезания; k_n, k_a – постоянные коэффициенты.

Поскольку калибрующая трубка воспринимает гидродинамические и механические нагрузки от действия быстро движущихся частиц абразива, которые вводятся в поток жидкости по срезу сопла, поэтому изнашивание проявляется в увеличении калибрующего отверстия D_k свыше установленного предельного размера и скалываний отдельных элементов, вследствие чего меняется геометрия сформированной канавки реза (рис. 6). Это повреждение обусловлено явлениями износа. Логически возникает задача повышения стойкости калибрующих трубок путем нанесения защитных покрытий.

Использование специальных износостойких покрытий позволяет значительно повысить срок стойкости материалов в агрессивных средах, улучшить стабильность процесса за счет менее интенсивной динамики изменения начальных геометрических параметров канала [11]. Однако ныне не существует четких рекомендаций относительно типа покрытий, которые могут быть использованы в данной практике, а также рациональных технологий нанесения таких покрытий на внутреннюю поверхность канала.

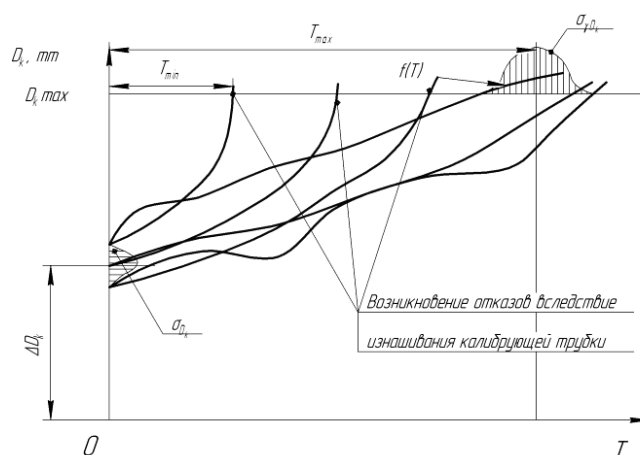
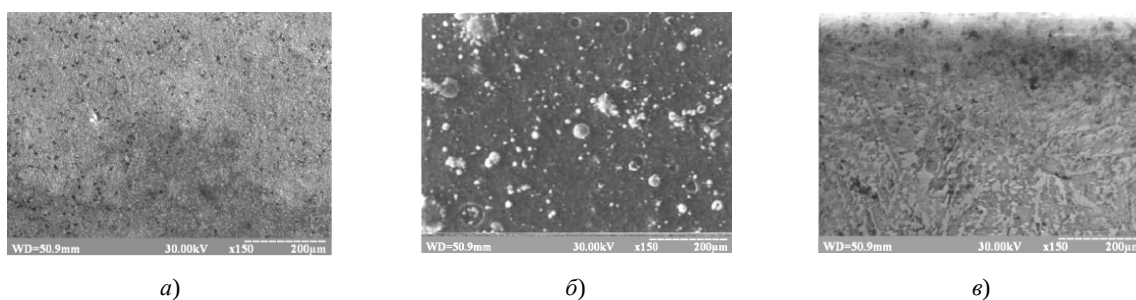


Рис. 6. Зависимость изменения калибрующего отверстия от времени срабатывания

При решении вопроса относительно целесообразности использования определенных поверхностных покрытий испытывали образцы на гидроабразивную стойкость размером $40 \times 10 \times 5$ мм из твердого сплава ВК 8, который является инструментальным материалом элементов систем гидроабразивной обработки, как без покрытия, так с вакуум-плазменным покрытием TiN, с азотированным слоем и комбинированным покрытием из азотированного слоя и TiN (рис. 7). Режимы нанесения покрытий приведены в таблице.

Рис. 7. Микроэлектронные исследования сплава ВК 8:
а – без покрытия; б – с покрытием TiN; в – с азотированным поверхностным слоем

Режимы нанесения покрытий

Параметры	Вакуум-плазменное напыление TiN	Ионно-плазменное термоциклическое азотирование
Давление рабочее P	$2,2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.	100 Па
Сила тока дуги I_0 , А	100	10
Температура T , °C	520	550
Напряжение U , В	500	600
Время, мин	40	360

Для микроэлектронных исследований, с учетом функционально-ориентированного подхода, на плоские пластинки наносились покрытия, которые устанавливались для исследований под определенными углами к натекающей струе (см. рис. 7).

Функционально-ориентированный подход предполагает изготовление калибрующей трубки по специальной технологии, которая основана на точной топологично ориентированной реализации потребного множества алгоритмов технологического воздействия средств обработки на необходимых микро-, макрозонах и участках изделия, которые функционально отвечают условиям их эксплуатации в каждой отдельной его зоне.

Для проведения сравнительного анализа все экспериментальные исследования производились при одних и тех же параметрах обработки, которые были приняты следующими: давление натекания – 280 МПа; объемная концентрация абразива в суспензии – 0,6 кг/мин; время обработки – 10,5 минут.



Рис. 8. Установка исследуемого образца.
Рабочий стол гидрорежущей машины ЛСК-400-5

Исследование влияния угла атаки на износостойкость образцов проводились с использованием абразива в суспензии гранатового песка с зернистостью 30 меш. Расстояние между исходным сечением эжекционной насадки струйного аппарата и образцом принималось равным 80 мм.

На рисунке 9 представлены сравнительные диаграммы изнашивания покрытий TiN и комбинированного покрытия азотированный слой + TiN, представленные в виде глубины повреждения слоя, измеренного относительно плоскости обрабатываемой поверхности. Угол натекания на образцы – 15° ($\pi/12$).

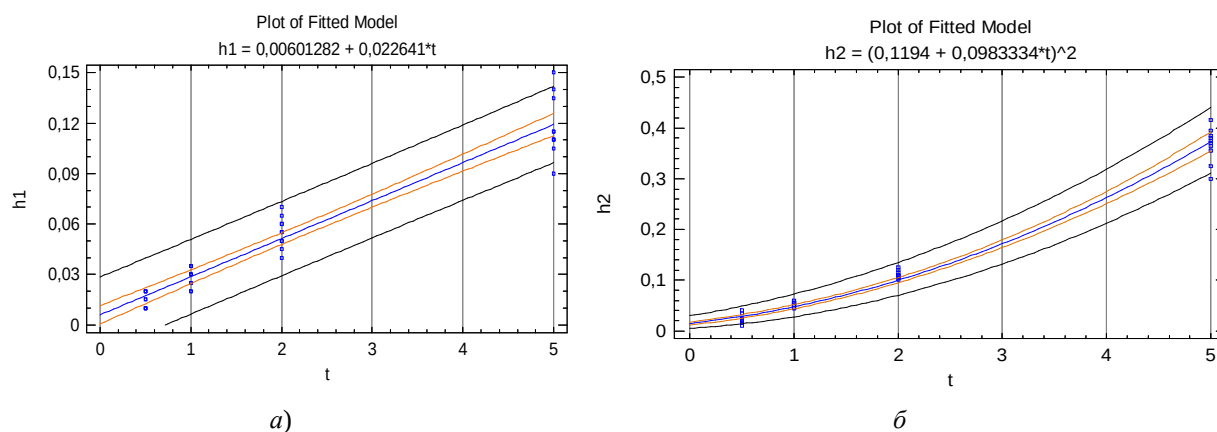


Рис. 9. Сравнительные диаграммы изнашивания покрытия TiN (а) и комбинированного покрытия азотированный слой + TiN (б)

Установлено, что динамика повреждения защитных покрытий принципиально отличается: покрытие TiN изнашивалось более динамично и через 3 мин повреждение достигло максимума. После этого скорость повреждения замедлилась, и на образцах начала наблюдаться зоны почти полного его изъятия. В дальнейшем началось активное разрушение материала основы (рис. 10).



Рис. 10. Исследуемые образцы после испытаний

Образцы с комбинированным покрытием были более стойкими к жидкостно-абразивному и кавитационному изнашиванию (почти в 3 раза). Изнашивание происходило равномерно, без образования областей отслоения.

На приведенных диаграммах представлена зависимость степени повреждения в виде глубины лунки, которая образовывалась на поверхности (h) в течение установленного времени. Построена зависимость изменения глубины сформированной лунки в функции угла натекания струи α .

Влияние угла натекания струи на скорость снятия покрытия определяли путем измерения проникновения струи в исследуемый образец за время, равное 1 мин (рис. 11). Измерения осуществляли в диапазоне углов от 3° ($\pi/60$) до 30° (дальнейшее увеличение углов приводит к полному разрушению покрытия и основы и получению паза 3...4 мм). Адекватность полученных моделей – 95 %.

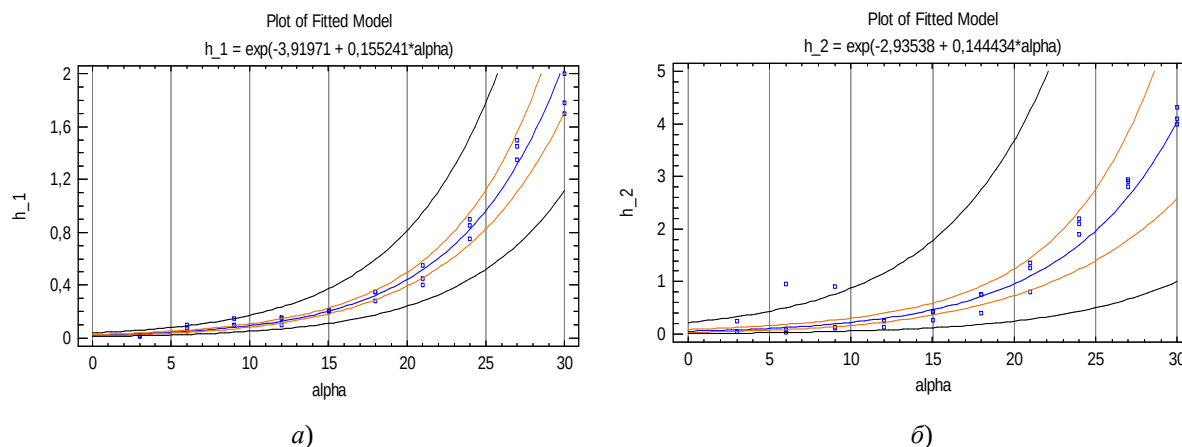


Рис. 11. Зависимость изнашивания покрытия TiN (а) и комбинированного покрытия азотированный слой + TiN от угла натекания струи (б)

По полученным данным несложно сделать вывод, что наиболее эффективно работает покрытие при касательном натекании струи. Принятое время срабатывания – 1 мин не является показательным, поскольку такую продолжительность необходимо было установить для обеспечения сравнения измерений динамики изнашивания при больших углах натекания.

Сравнение стойкости образцов с покрытиями и без покрытия доказывает, что покрытие позволяет получить двузонную динамику роста исходного отверстия калибрующей трубки: до времени срабатывания покрытия и при работе трубки с уже изношенным покрытием.

Итак, сравнительные экспериментальные испытания показали, что в зависимости от режимов обработки, образцы с комбинированным покрытием из азотированного слоя и TiN изнашиваются менее интенсивно, чем образцы без покрытия при влиянии гидроабразивного потока.

Отличие механизмов взаимодействия абразивных частиц с поверхностью вдоль канала трубки и стремление обеспечить приблизительно одинаковую низкую скорость эрозии, учитывая современное развитие функционального подхода, рассмотрено в работах О. Михайлова [12–13] и других авторов. Это позволяет сделать вывод о наличии на поверхности четко детерминированных функциональных макрозон, отличительные свойства которых требуют и различных средств их обеспечения.

Таковыми средствами могут стать соответствующие покрытия, которые удовлетворительно будут воспринимать тот или другой вид абразивной нагрузки. Однако сложность состояла как раз в том, что диаметр отверстия трубки неодинаковый и достаточно малый – от 4,2 мм на входе трубки и до 0,95...1,20 мм на ее срезе.

Однако использование покрытий предусматривает как изменение конструкции самой трубки, так и изменение материала, из которого она изготовлена.

Нами предложено использовать калибрующие трубки принципиально новой конструкции. Износостойкая калибрующая трубка для формирования жидкостно-абразивной режущей струи была изготовлена из двух симметричных частей. Части трубки объединены между собой механическим путем, в частности, эти обе части трубки охвачены обоймой, посаженной с натягом, с образованием продольного осевого канала для прохождения рабочей жидкости с абразивом. На поверхности продольного осевого канала для предупреждения развития повреждений от гидроабразивного влияния потока нанесен износостойкий фрагментарный слой. Износостойкий фрагментарный слой согласно функционально-ориентированному подходу представляет собой адгезионную пленку из материалов, интенсивность изнашивания которых для разных условий воздействия гидроабразивного потока одинакова. Длина износостойкого слоя (его фрагмента) соответствует длине участка, где действие абразивных частиц отличается большей интенсивностью. Согласно функционально-ориентированному подходу такое изделие может реализовывать ряд функций. По нашему мнению, изготовление трубки с износостойким фрагментарным слоем является

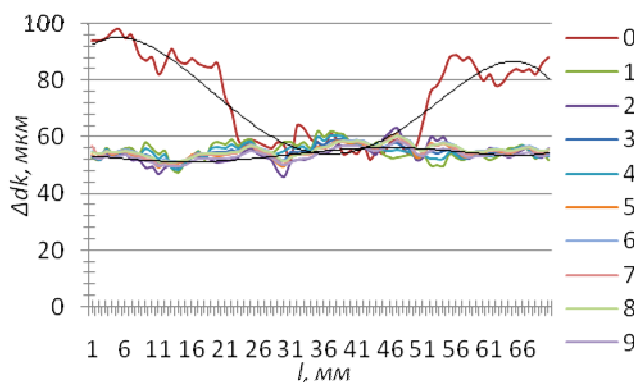
более рациональным, чем изготовление всей трубки не только из более износостойкого, но и из более дорогостоящего материала.

Для проверки изложенных соображений и получения реальных профилей изнашивания было изготовлено 10 калибрующих трубок с нанесенными фрагментарными слоями (рис. 12) и проверено после установленного срока эксплуатации ($T = 10,0$ ч). Материал трубки – регенерированный твердый сплав группы ВК с покрытием из нитрида титана TiN толщиной 1,5 мм (фракционность 30/50 мкм).

Покрытие в зоне 1, где движение абразивных зерен менее упорядочено, наносили методом электроконтактного припекания. В зоне 2, где канал воспринимает в основном скользящее влияние от частиц движущегося абразива, наносили PVD-покрытие на торце трубки, где имеет место влияние унесенных с поверхности обработки частиц, наносили PVD-покрытие с азотированием (N+TiN). Толщина азотированного слоя – 200 мкм, покрытие TiN – 10 мкм.



а)



б)

Рис. 12. Трубки с нанесенным покрытием (а) и профиль изнашивания канала после 10 часов работы (б):

0 – профиль изношенного канала трубки без покрытия;

1–9 – профили изношенных каналов с фрагментарным покрытием

Результаты, полученные в ходе эксперимента, показали:

- нанесенные покрытия надежно защищают канал трубки;
- удалось избежать возникновения зародышей интенсивного разрушения на поверхности канала;
- проявились места стыковки различных слоев по длине канала;
- слой PVD-покрытия с азотированием (N+TiN) в 200 мкм оказался практически удаленным;
- развитие повреждения канала происходило равномерно, практически без нарушения исходной диаметральной части.

Исследования выполняли с использованием лазерно-струйного комплекса ЛСК-400-5.

Таким образом, можно констатировать, что предложенный нами функциональный подход является более эффективным в сравнении с другими средствами снижения интенсивности изнашивания и повышения стабильности геометрических параметров канала трубки, представленными в работах [14–15]. В то же время нуждаются в дальнейшем исследовании варианты нанесения износостойких слоев, а в перспективе – попытки инверсного создания калибрующей трубки, т.е. наращивание пластов от канала (выполненного из материала, который затем может быть легко удален) к внешней поверхности. В таком случае очевидно преимущество формирования такого поверхностного слоя канала, при котором нитридные или карбидные соединения могут быть сориентированы так, чтобы образованная поверхность имела низкое гидравлическое сопротивление. Для этих исследований целесообразно привлечение средств Rapid Prototyping. Сейчас ведутся работы с заменой регенерированного твердого сплава более дешевым материалом, например легированной сталью. При этом выявленные закономерности и подходы, по нашему мнению, могут быть использованы в любых ответственных струйных устройствах.

Выводы. Построенная модель течения двухфазной высокоскоростной гидроабразивной режущей струи в проточной части калибрующей трубки позволила доказать существование определенных зон, в которых отлительно проявляются процессы повреждения канала, на основе чего предложено использовать функциональный подход и создана новая конструкция трубки, которая предусматривает наличие фрагментарных функциональных слоев на поверхности канала. Выполненные экспериментальные испытания предлагаемых типов калибрующих трубок доказали приведенные соображения.

Гарантированная стойкость калибрующих трубок предлагаемого типа превышает стойкость обычных трубок в среднем в 1,5...1,8 раза и составляет около 17,5 часов, при этом рассеивание составляет 10...12 %.

Полученные функциональные зависимости изнашивания калибрующей трубки с покрытиями по критериям гидроабразивной стойкости дополняют общую методологическую информационную базу и, безусловно, содействуют разработке принципа управления свойствами поверхностного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саленко, О.Ф. Перспективи ринку обладнання для листової обробки / О.Ф. Саленко, О.В. Фомовська // Вісник КДПУ. – 2008. – № 6(48). – С. 45–50.
2. Степанов, В.С. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей. Библиотека технолога / В.С. Степанов, Г.В. Барсуков. – М.: Машиностроение, 2004. – 240 с.
3. Цыгановский, А.Б. Определение степени влияния угла атаки струи на производительность и качество гидроабразивной обработки затопленными струями / А.Б. Цыгановский // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2009. – № 6. – С. 220–228.
4. Проволоцкий, А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей / А.Е. Проволоцкий. – К.: Техника, 1989. – 177 с.
5. Непомнящий, Е.Ф. Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа / Е.Ф. Непомнящий // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа / Е.Ф. Непомнящий. – М.: Наука, 1971. – С. 190–200.
6. Клейс, И.Р. Основы выбора материалов для работы в условиях газоабразивного изнашивания / И.Р. Клейс // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 2. – С. 263–271.
7. Билик, Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов / Ш.М. Билик. – М.: Машиностроение, 1960. – 198 с.
8. Подураев, В.Н. Физико-химические методы обработки / В.Н. Подураев, В.С. Камалов – М.: Машиностроение, 1973. – 346 с.
9. Виноградов, В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
10. Дудюк, В.О. Аналіз динамічного навантаження елементів зони гідро різання із використанням прикладного пакету FlowVision / В.О. Дудюк // Вісник КНУ імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 6(65). – С. 59–62.
11. Лопата, Л.А. Адгезионная прочность и остаточные напряжения при электроконтактном припекании порошковых покрытий / Л.А. Лопата // Проблемы прочности. – 2010. – № 4. – С. 71–76.
12. Михайлов, А.Н. Разработка технологий на основе функционально-ориентированного подхода / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 450 с.
13. Михайлов, А.Н. Упрочняющие технологии и покрытия / А.Н. Михайлов, В.А. Михайлов, Е.А. Михайлова // Машиностроение. – 2005. – № 7. – С. 3–9.
14. Сичук, В.А. Нові принципи конструювання і виготовлення сопел для абразиво-струменевих машин / В.А. Сичук, О.В. Заболотний // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2012. – № 1(6). – С. 317–321.
15. Anand Umang. Prevention of nozzle wear in abrasive water suspension jets (AWSJ) using porous lubricated nozzles. / Anand Umang, Katz Joseph // Baltimore, MD 21218. Trans. ASME: J. Tribol. – 2003. – P. 168–180.

Поступила 11.02.2014

USING A FUNCTIONAL APPROACH IN SOLVING PROBLEMS IMPROVE PERFORMANCE WATERJET EQUIPMENT

**M. KHOROLSKAJA, A. SALENKO, A. DUDAN,
V. NIKOLAJCHUK, T. VORONA, E. KOZHEVNIKOVA**

The paper shows the influence of parameters of the calibration tube jet-abrasive devices on the quality of the process of waterjet cutting critical parts. The results of modeling the formation of two-phase flow and its movement in the calibration tube. Determined that the effects wear ductal fluid of the tube varying intensity and character. In this regard there is the need for functional-oriented approach to the choice of means to ensure the desired geometric parameters of the tube. It is concluded that the decrease in the intensity of ductal Shot material of the tube and thus maintain its geometric parameters is possible by the use of suitable protective coatings, thickness and physical and mechanical characteristics are selected on the basis of Value attributes according to the intensity and type of abrasive loading surface.

УДК 537:669.112.227.322

ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЛАГОСОДЕРЖАЩЕГО ПОРОШКООБРАЗНОГО ПЕРЛИТА

*О.В. БОЙПРАВ; д-р техн. наук, проф. Т.В. БОРБОТЬКО;**д-р техн. наук, проф. Л.М. ЛЫНЬКОВ**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

Предложено использовать влагосодержащий порошкообразный перлит для создания экранов электромагнитного излучения. Получены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи, а также ослабления мощности электромагнитного излучения диапазона частот 0,7...17 ГГц экранов на основе данного порошкообразного материала, характеризующегося различными величинами влагосодержания. С целью получения стабильного влагосодержания в перлите, для его пропитывания предложено использовать водные растворы хлорида кальция, концентрация которых составляет 10...40 масс. %. Показано, что увеличение в пределах от 10 до 40 масс. % концентрации водного раствора хлорида кальция, использованного для пропитывания перлита, приводит к снижению значений коэффициентов передачи изготавливаемых на его основе экранов электромагнитного излучения в диапазоне частот 1,7...3 ГГц на 2...20 дБ (в зависимости от размера фракций перлита и значения приращения концентрации водного раствора хлорида кальция). При этом значения коэффициентов отражения таких экранов увеличиваются в среднем на 5 дБ. Исследованные экраны могут использоваться в процессе строительства помещений, в которых предполагается размещение радиоэлектронного оборудования, выполняющего обработку информации.

Введение. Экраны электромагнитного излучения (ЭМИ) на сегодняшний день используются для решения следующих задач:

- ослабление паразитных индуктивных, емкостных и электромагнитных связей между элементами радиоэлектронного оборудования;
- защита радиоэлектронного оборудования от внешних электромагнитных помех;
- защита человека от ЭМИ радиоэлектронного оборудования [1];
- защита информации от утечки по электромагнитному каналу, обеспечиваемая за счет снижения уровней побочного ЭМИ, сопровождающего процесс функционирования радиоэлектронного оборудования, выполняющего обработку данных.

Для изготовления экранов ЭМИ в настоящее время наиболее широко применяются порошкообразные материалы, физические свойства которых (электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость) способствуют обеспечению потерь энергии взаимодействующих с ними электромагнитных волн (ЭМВ). К таким материалам относятся шунгит, бентонит, ферриты и т.п. Управляемо изменять их характеристики отражения и передачи ЭМИ возможно путем включения в них дополнительных компонентов. Это проводится с использованием одного из следующих способов:

- 1) химическое осаждение металлов (никеля, меди, кобальта и т.п.) из водных растворов на поверхность порошкообразного материала;
- 2) пропитывание порошкообразного материала водой или водными растворами.

С точки зрения простоты реализации второй способ является более приемлемым по сравнению с первым, ввиду того, что технологический процесс получения влагосодержащих материалов требует меньше временных и финансовых затрат. Величина влагосодержания порошкообразного материала, пропитанного водой или водными растворами, оказывает влияние на значение его диэлектрической проницаемости, а следовательно и на его характеристики отражения и передачи ЭМИ. При этом максимальная масса влаги, которую может сорбировать порошкообразный материал, определяется его пористостью. Следовательно, путем регулирования пористости порошкообразного материала, пропитываемого водой или водными растворами, можно управляемо изменять его характеристики отражения и передачи ЭМИ, а значит и аналогичные характеристики электромагнитных экранов на его основе. В настоящее время одним из материалов, производимых на промышленной основе и классифицируемых в процессе производства на марки в зависимости от использованной технологии изготовления, которая и определяет их размер фракций и пористость, является порошкообразный перлит.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния влагосодержания порошкообразного перлита на характеристики отражения, передачи и ослабления мощности ЭМИ экранов, формируемых на его основе.

Методика проведения эксперимента. Для изготовления экранов ЭМИ использовался порошкообразный перлит трех типов. Перлит типа 1 характеризуется размером фракций 3 мм, типов 2 и 3 – 1...3 мм

и 0,5 мм соответственно. Перлит типа 1 изготовлен на основе обсидиановой породы, перлит типов 2 и 3 – на основе перлитовой породы [2]. С целью получения стабильного влагосодержания в перлите для его пропитывания использовались водные растворы хлорида кальция, концентрация которых составляла 10 масс. %, 20, 30 и 40 масс. %. Так как хлорид кальция характеризуется свойством гигроскопичности, то он способствует удержанию влаги в пропитанных им материалах. Максимальная растворимость хлорида кальция в воде при температуре 20 °С составляет 42,7 масс. % [3]. С использованием гравиметрического метода получены значения величин стабильного влагосодержания перлита выбранных марок, пропитанного водными растворами хлорида кальция указанных концентраций. Данные значения приведены в таблице 1. Измерения проводились при температуре воздуха 20 °С и его относительной влажности 80 %.

Таблица 1

Значения величин стабильного влагосодержания перлита,
пропитанного водными растворами хлорида кальция различной концентрации

Тип перлита	Концентрация использованного водного раствора хлорида кальция, масс. %	Влагосодержание перлита, масс. %
1	10	80
2	10	90
3	10	90
1	20	160
2	20	210
3	20	160
1	30	270
2	30	290
3	30	190
1	40	300
2	40	350
3	40	310

Различные значения стабильного влагосодержания перлита типов 1, 2 и 3, пропитанного водными растворами хлорида кальция равной концентрации, обусловлено различными пористостью и размером фракций данных порошкообразных материалов. Наименьшей пористостью характеризуется перлит типа 1, ввиду того, что обсидиановая порода содержит меньше связанной воды по сравнению с перлитовой породой, а также ввиду того, что обсидиановая порода характеризуется меньшей пористостью (~ 1 %) по сравнению с перлитовой породой (5...30 %). Размер пор перлита типа 2 превышает размер пор перлита типа 3. Однако перлит типа 3 характеризуется наибольшим соотношением размеров пор и фракций. На поверхности зерен перлита фракции 0,1...0,6 мм присутствуют поры, размер которых составляет 1/3 от размера фракции. Кроме того, перлит типа 2 содержит больше закрытых пор (~ 18 %) по сравнению с перлитом типа 3 (~ 13 %). Указанные свойства и обуславливают более высокие значения величин стабильного влагосодержания перлита типа 2, пропитанного водными растворами хлорида кальция, по сравнению с аналогичными значениями для перлита типа 3 [4]. Максимальная масса 1 м³ перлита типа 1 составляет 50 кг, перлита типов 2 и 3 – 65 кг и 150 кг соответственно.

Таким образом, на основании данных таблицы 1 можно сделать вывод о том, что в перлите типа 3, пропитанном 10 %-ным водным раствором хлорида кальция, и перлите типа 1, пропитанном 30 %-ным водным раствором хлорида кальция, содержатся одинаковые объемы влаги (0,135 об. %). Указанная величина сопоставима с величиной объема влаги, содержащегося в перлите типа 2, пропитанном 20 %-ным водным раствором хлорида кальция. Экраны ЭМИ изготавливались путем заполнения перлитом определенного типа, пропитанного раствором хлорида кальция одной из указанных концентраций, емкости, имеющей форму параллелепипеда.

Общее количество видов изготовленных экранов ЭМИ – 12. При этом было изготовлено по 3 идентичных экрана ЭМИ каждого из видов для того, чтобы провести оценку повторяемости результатов измерений. Характеристики каждого из видов изготовленных экранов ЭМИ приведены в таблице 2.

Измерения параметров характеристик отражения, передачи и ослабления мощности ЭМИ исследованных экранов проводились в диапазоне частот 0,8...17 ГГц по методикам, приведенным в [5].

При этом в процессе измерений использовались панорамный измеритель коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01–18 и измеритель мощности PM 0,01–37,5.

Общее количество проведенных для каждого из экранов измерений коэффициентов отражения, передачи и ослабления мощности ЭМИ составило 10. Указанное количество измерений было проведено для того, чтобы выполнить оценку повторяемости результатов.

Таблица 2

Характеристики изготовленных экранов ЭММИ

Наименование (№) экрана ЭМИ	Тип использованного перлита	Концентрация использованного водного раствора хлорида кальция, масс. %
№ 1	1	10
№ 2	1	20
№ 3	1	30
№ 4	1	40
№ 5	2	10
№ 6	2	20
№ 7	2	30
№ 8	2	40
№ 9	3	10
№ 10	3	20
№ 11	3	30
№ 12	3	40

Результаты и их обсуждение. Установлено, что значения коэффициентов передачи ЭМИ экранов № 1, № 5 и № 9 в диапазоне частот 0,8...3 ГГц составляют соответственно –1,5...–8 дБ, –1,5...–3,5 дБ, –2...–6 дБ, в диапазоне частот 3...17 ГГц равны –7...–27 дБ. Увеличение концентрации водного раствора хлорида кальция, используемого для пропитывания перлита, приводит к снижению значений коэффициентов передачи изготавливаемых на его основе экранов ЭММИ в диапазоне частот 1,7...3 ГГц на 2 дБ (экран № 2), 4...6 дБ (экран № 3), на 4...12 дБ (экран № 4, экран № 6, экран № 10), на 8...18 дБ (экран № 7, экран № 11), 8...20 дБ (экран № 8, экран № 12). В диапазоне частот 3...7 ГГц значения коэффициентов передачи ЭМИ экранов № 1, № 5 и № 9 превышают в среднем на 7 дБ аналогичные значения иных экранов ЭМИ, исследованных в рамках настоящей работы. Это обусловлено тем, что перлит, использованный для изготовления данных экранов, характеризуется большим уровнем влагосодержания, а значит, обеспечивает больший уровень поляризационных, релаксационных потерь, а также потерь на электропроводность энергии ЭМИ [6; 7]. Потери энергии ЭМИ, взаимодействующего с изготовленными экранами, связано также с дифракцией ЭМВ на частицах перлита. При этом гранулометрический состав перлита определяет амплитуду рассеиваемых им ЭМВ и количество углов, под которыми они рассеиваются [8].

Установлено, что величина влагосодержания перлита не оказывает влияния на значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ в диапазоне частот 7...17 ГГц электромагнитных экранов на его основе.

В диапазоне 0,8...3 ГГц частотные зависимости коэффициентов отражения ЭМИ исследованных экранов носят резонансный характер. При этом значения коэффициентов отражения ЭМИ на резонансных частотах определяются величиной влагосодержания перлита, использованного для изготовления экрана. Увеличение концентрации водного раствора хлорида кальция приводит к увеличению в среднем на 0,2 ГГц значений резонансных частот экрана ЭМИ в диапазоне частот 0,8...3 ГГц. Значения коэффициентов отражения ЭМИ экранов, изготовленных на основе перлита типов 1, 2 и 3, пропитанного 10 %-ным водным раствором хлорида кальция, составляют соответственно –5...–25 дБ, –5...–35 дБ, –5...–20 дБ. Увеличение концентрации водного раствора хлорида кальция, используемого для пропитывания перлита, приводит к увеличению значений коэффициентов отражения экранов ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц на 3...5 дБ. Размещение исследованных экранов на металлической подложке привело к изменению значений их коэффициентов отражения на резонансных частотах на 2...10 дБ, а также увеличению значений этих частот в среднем на 0,5 ГГц. Выявлено, что чем выше концентрация водного раствора хлорида кальция, использованного для пропитывания перлита, тем меньше варьируются значения коэффициентов отражения ЭМИ экранов, размещенных на металлической подложке.

Электромагнитные экраны, изготовленные на основе перлита типа 2, характеризуются меньшими значениями коэффициентов отражения ЭМИ по сравнению с экранами, изготовленными на основе перлита типов 1 и 3 в связи с тем, что перлит типа 2 обладает неоднородным гранулометрическим составом [9].

Частотные зависимости, полученные на основе результатов измерений средних значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ экранов № 9, № 10, № 11 и № 12, представлены на рисунке 1 и рисунке 2.

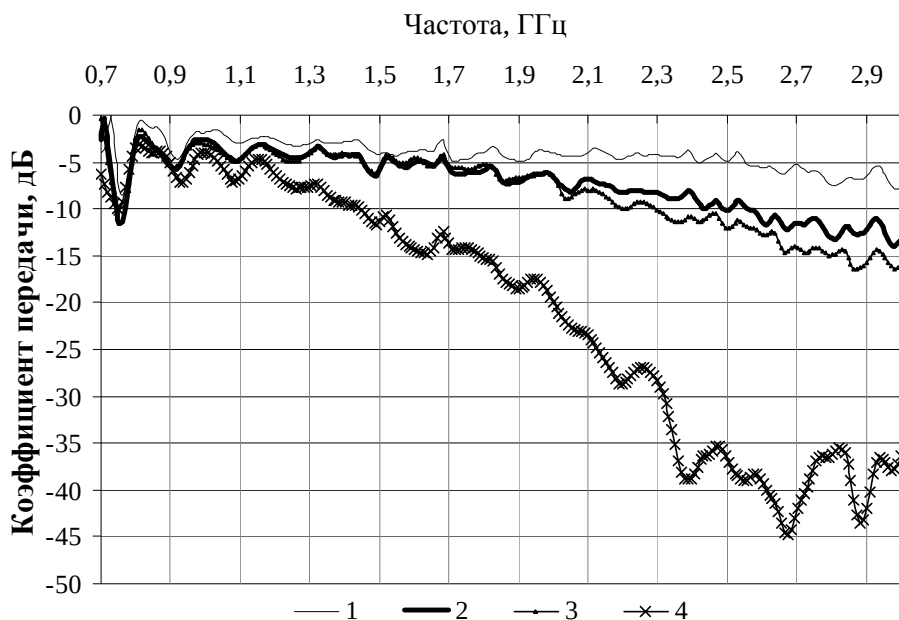


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициентов передачи экранов ЭМИ в диапазоне 0,7...3 ГГц:
1 – экран № 9; 2 – экран № 10; 3 – экран № 11; 4 – экран № 12

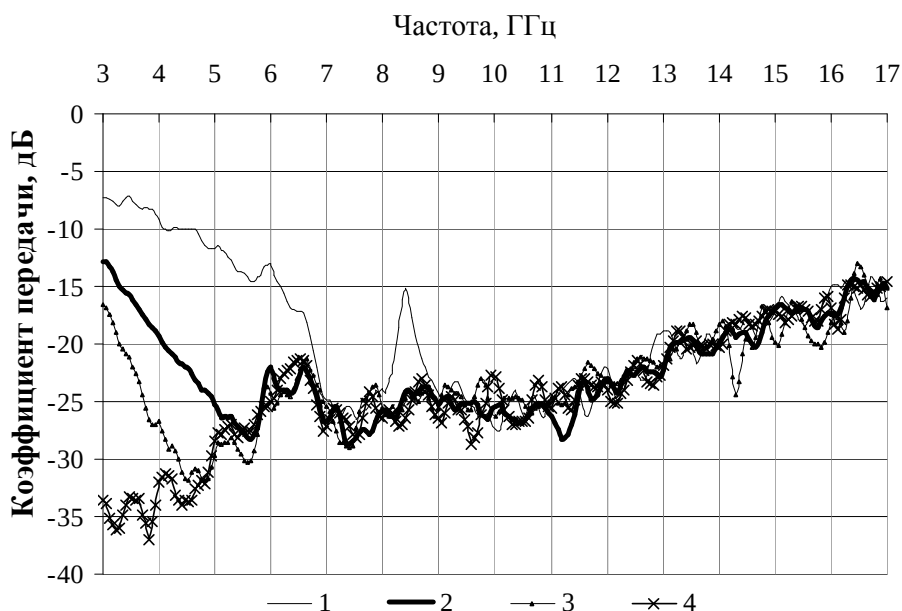


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов передачи экранов ЭМИ в диапазоне 3...17 ГГц:
1 – экран № 9; 2 – экран № 10; 3 – экран № 11; 4 – экран № 12

Частотные зависимости ослабления мощности ЭМИ экранами № 6 и № 9 представлены на рисунке 3 и рисунке 4 соответственно (кривые 1 соответствуют зависимостям, параметры которых измерены при уровне мощности падающего ЭМИ, равном 1 мВт; кривые 2, 3, 4 и 5 – при 2 мВт, 3, 4 и 5 мВт).

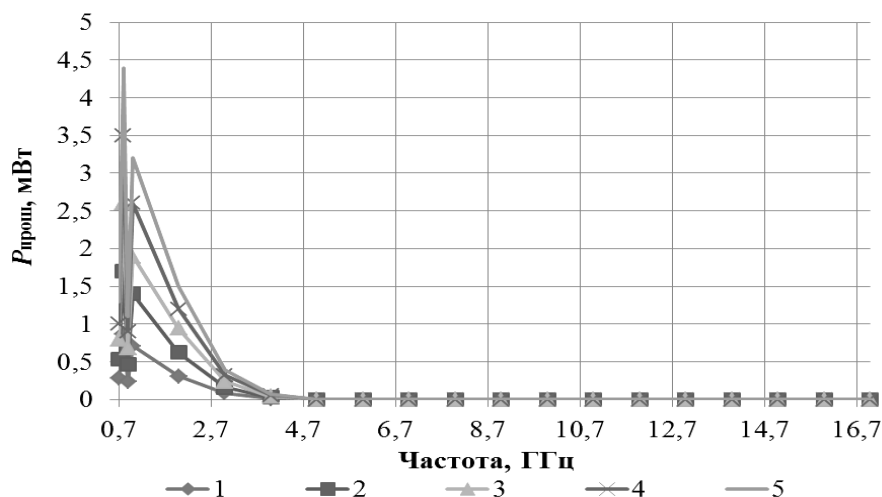


Рис. 3. Частотные зависимости ослабления мощности ЭМИ экраном № 6

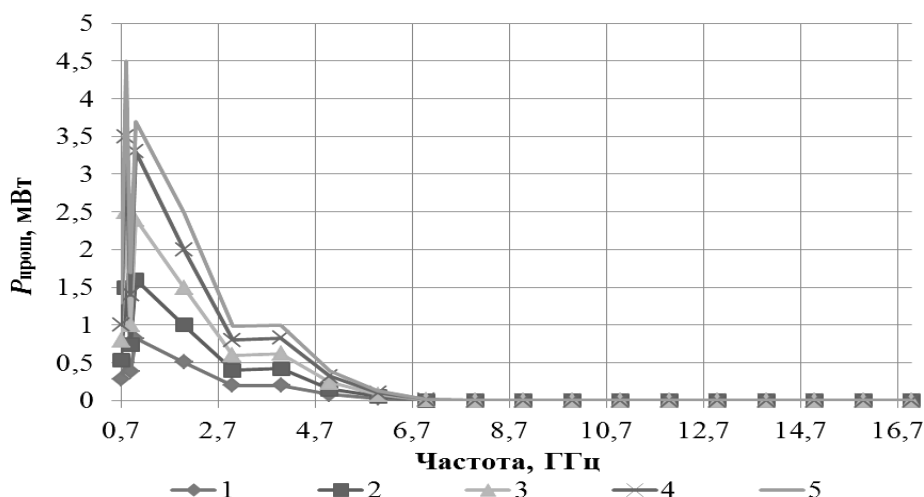


Рис. 4. Частотные зависимости ослабления мощности ЭМИ экраном № 9

На рисунке 3 и рисунке 4 $P_{\text{прош}}$ – мощность ЭМИ, прошедшего через электромагнитный экран.

Установлено, что в диапазоне частот 9...17 ГГц (для экрана № 1), 7...17 ГГц (для экранов № 2, № 5, № 9), 6...17 ГГц (для экрана № 10), 5...17 ГГц (для экранов № 3, № 4, № 6, № 11), 4...17 ГГц (для экранов № 7, № 8), 3...17 ГГц (для экрана № 12) обеспечивается полное ослабление мощности ЭМИ.

Рассчитано, что средние значения результатов серий измерений, проведенных для каждого из экранов одного вида, отличаются не более, чем на 5 %.

Закключение. В результате проведенного исследования установлено, что за счет изменения размера фракций порошкообразного перлита и величины его влагосодержания можно управляемо изменять значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ, а также ослабления мощности ЭМИ экранами на его основе. Показано, что увеличение в пределах от 10 до 40 масс. % концентрации водного раствора хлорида кальция, использованного для пропитывания перлита, приводит к снижению значений коэффициентов передачи изготавливаемых на его основе экранов ЭМИ в диапазоне частот 1,7...3 ГГц на 2...20 дБ (в зависимости от размера фракций перлита и значения приращения концентрации водного раствора хлорида кальция). При этом значения коэффициентов отражения ЭМИ увеличиваются в среднем на 5 дБ.

В целях достижения стабильного влагосодержания перлита для его пропитывания можно, наряду с водными растворами хлорида кальция, использовать водные растворы иных гигроскопичных материалов (например, хлорида магния).

Исследованные экраны ЭМИ могут использоваться в процессе строительства помещений, в которых предполагается размещение радиоэлектронного оборудования, выполняющего обработку информации. При этом данные экраны могут применяться в качестве облицовочных элементов стен таких поме-

щений. На основе влагосодержащего перлита могут также изготавливаться композиционные радиоэкранирующие материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро, Д.Н. Электромагнитное экранирование / Д.Н. Шапиро. – Долгопрудный: Издат. Дом «Интеллект», 2010. – 120 с.
2. Мелконян, Р.Г. Аморфные горные породы – новое сырье для стекловарения и строительных материалов / Р.Г. Мелконян; под общ. ред. И.И. Мазура. – М.: «НИИ Природа», 2002. – 388 с.
3. Позин, М.Е. Технология минеральных солей / М.Е. Позин. – Л.: Химия, 1974. – 792 с.
4. Адрианов, Р.А. Пенопласты на основе фенолформальдегидных полимеров / Р.А. Адрианов, Ю.Е. Пономарев. – Ростов н/Д: Изд-во Ростов. ун-та, 1987. – 80 с.
5. Экраны электромагнитного излучения на основе порошкообразных отходов производства чугуна / О.В. Бойправ, Т.В. [и др.] // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2013. – Вып. № 67. – С. 19. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41430>.
6. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 544 с.
7. Бензарь, В.К. Техника СВЧ-влажнометрии / В.К. Бензарь. – Минск: Выш. школа, 1974. – 349 с.
8. Уфимцев, П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции / П.Я. Уфимцев. – М.: Сов. радио, 1962. – 244 с.
9. Фок, В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн / В.А. Фок. – М.: Сов. радио, 1970. – 520 с.

Поступила 10.04.2014

ELECTROMAGNETIC RADIATION SHIELDS BASED ON WATER CONTAINING POWDERED PERLITE

O. BOIPRAV, T. BORBOTKO, L. LYNKOU

It's proposed to use the water containing powdered perlite to create the electromagnetic radiation (EMR) shields. The frequency dependences of EMR reflection and transmission coefficients, as well as electromagnetic radiation power weakening of frequency range 0,7...17 GHz shields on the basis of this powdered material having different water content values is taken. It is proposed to use a calcium chloride water solutions in concentrations of 10...40 wt. % for perlite impregnation to obtain a stable water content in it. It is shown that increasing in the range of 10 to 40 wt. % of concentration of calcium chloride water solution, used for perlite impregnation reduces the values of the EMR transmission coefficients values of shields based on this material in frequency range of 1,7...3 GHz on 2...20 dB (depending on the perlite fractions size and increment value of calcium chloride water solution concentration). The EMR reflection coefficients values increase in this case on average by 5 dB. Investigated EMR shields can be used in the construction process of rooms, where radioelectronic equipment performing information processing is placed.

УДК 621.65.01

К ВОПРОСУ О ТЕОРЕТИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ РАДИАЛЬНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ С УЧЕТОМ СИЛЫ КОРИОЛИСА

канд. техн. наук, доц. В.Н. ПАВЛЕЧКО; канд. техн. наук, доц. С.К. ПРОТАСОВ
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Представлен анализ зависимостей для расчета теоретического давления, создаваемого рабочим колесом радиального нагнетателя, которые получены с учетом разности окружных скоростей колеса и среды, реакции лопастей по преодолению силы инерции среды в различных направлениях и мощности, необходимой для сообщения движения среде. Выводятся зависимости для определения давления с учетом работы, которую выполняют лопасти. Эти зависимости идентичны формулам, полученным ранее с использованием мощности, передаваемой лопастями среде. Установлено повышение общего давления, создаваемого колесом в радиальном направлении, при углах наклона лопастей до 90° и его снижение при углах более 90° .

Введение. Кинематическая структура потока во вращающихся криволинейных каналах рабочего колеса центробежной машины весьма сложна. Для определения давления, которое создает радиальный нагнетатель, используют следующие предположения [1]: 1) поток состоит из множества струй, повторяющих геометрическую форму лопасти; 2) все струи, составляющие поток, совершенно одинаковы геометрически и кинематически; 3) поток является плоским, т.е. градиент скорости вдоль оси, параллельной геометрической оси машины, отсутствует.

В соответствии со струйной теорией абсолютная скорость движения среды (c) является геометрической суммой окружной (u) и относительной (w) скоростей (рис. 1). Окружные скорости среды и колеса принимаются равными [1; 2].

Теоретическое давление (P_a), создаваемое рабочим колесом центробежной машины, определяется уравнением Эйлера [1–3]:

$$P_T = \rho(u_2 c_2 \cos \alpha_2 - u_1 c_1 \cos \alpha_1), \quad (1)$$

или с использованием тангенциальных составляющих абсолютных скоростей (см. рис. 1)

$$P_T = \rho(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}), \quad (2)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3 ; u_1, u_2 – окружная скорость колеса на входе и выходе среды, м/с ; c_1, c_2 – абсолютная скорость среды на входе и выходе из колеса, м/с ; α_1 и α_2 – угол между векторами окружной и абсолютной скоростей на входе и выходе из колеса, град; c_{1u}, c_{2u} – проекции абсолютных скоростей среды на векторы соответствующих окружных скоростей колеса на входе и выходе из него, м/с .

Обычно среда, поступающая из входного патрубка, движется по колесу в радиальном направлении, что соответствует ее безударному входу. В этом случае угол $\alpha_1 = 90^\circ$, и уравнения (1) и (2) упрощаются, так как $\cos 90^\circ = 0$ и $c_{1u} = 0$.

$$P_T = \rho u_2 c_2 \cos \alpha_2 = \rho u_2 c_{2u}. \quad (3)$$

В работе [4] отмечено, что из-за наличия тангенциальной составляющей относительной скорости w $\cos \beta$ тангенциальная скорость среды отличается от окружной скорости колеса радиального нагнетателя. Поэтому при лопастях, отогнутых назад относительно направления вращения колеса (см. рис. 1), среда запаздывает, и ее угловая и линейная скорости меньше соответствующих скоростей колеса.

Для лопастей, отогнутых вперед по ходу вращения, среда может иметь большие скорости, чем у колеса. Для лопастей, расположенных радиально, имеет место равенство угловых и линейных скоростей колеса и среды.

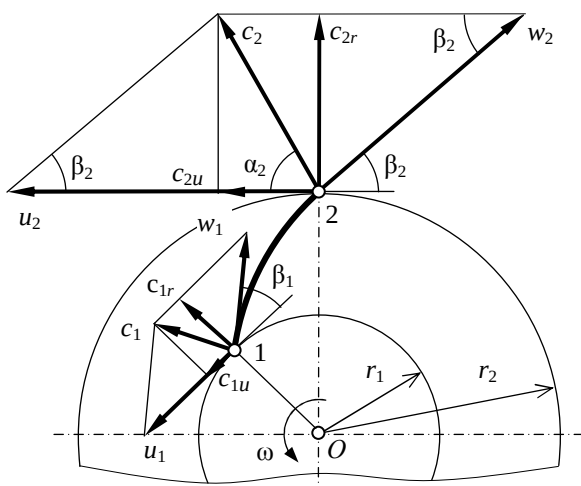


Рис. 1. Параллелограммы скоростей в рабочем колесе нагнетателя для лопастей, отогнутых назад

Основной движущей силой, действующей на среду в рабочем колесе, кроме центробежной силы, предложено учитывать реакцию лопастей по преодолению силы Кориолиса. Причем эта реакция разделена на тангенциальную и радиальную составляющие.

В отличие от струйной теории, предложено [4] представлять абсолютную скорость геометрической суммой скорости движения среды c_{2c} под действием реакции лопастей колеса по преодолению силы

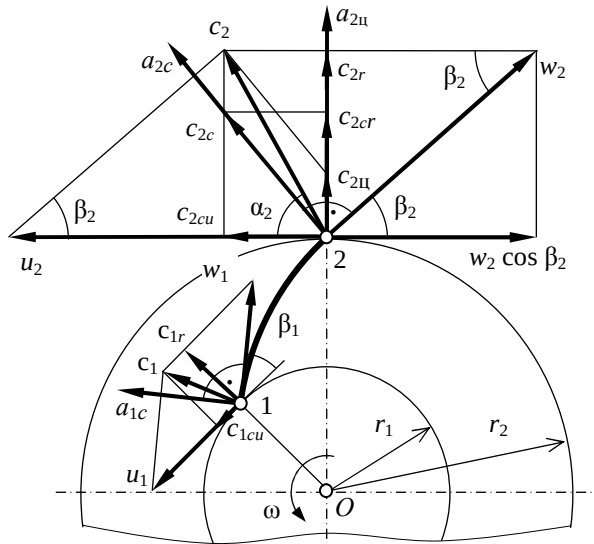


Рис. 2. Параллелограммы скоростей в рабочем колесе нагнетателя с учетом ускорения Кориолиса для лопастей, отогнутых назад

инерции и скорости c_{2u} под действием центробежной силы на выходе из колеса (рис. 2).

В работе [4] найдены выражения реакции лопасти по преодолению силы инерции среды в различных направлениях и мощности, необходимые для сообщения движения массе среды.

Делением этих мощностей на расход среды получены выражения давления, передаваемого рабочим колесом среде:

- в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти

$$P = \frac{\rho}{\sin^2 \beta} (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}); \quad (4)$$

- в направлении окружной скорости

$$P_u = \rho (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}); \quad (5)$$

- в радиальном направлении

$$P_r = \rho \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}). \quad (6)$$

Основная часть. В данном исследовании необходимые зависимости выводятся через работу, выполняемую лопастями радиального нагнетателя. В колесе, вращающемся с угловой скоростью ω , изменение направлений окружной u и относительной w скоростей вызывает появление ускорения Кориолиса, которое устремлено в сторону, повернутую на 90° от относительной скорости по направлению вращения.

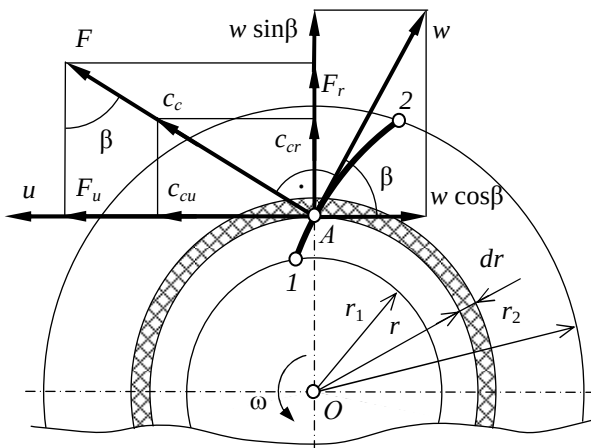


Рис. 3. К выводу расчетных зависимостей

ную в сторону окружной скорости u . Тангенциальная часть $w \cdot \cos \beta$ вызывает реакцию лопасти F_r , направленную радиально. Соответствующие реакции колеса определяются помимо (7) зависимостями:

$$F_u = 2 m \omega w \sin \beta, \quad (8)$$

$$F_r = 2 m \omega w \cos \beta. \quad (9)$$

За промежуток времени Δt точка A на поверхности лопасти проходит путь dr в радиальном направлении со скоростью $w \cdot \sin \beta$.

Промежуток времени равен

$$\Delta t = \frac{dr}{w \sin \beta}. \quad (10)$$

За этот промежуток времени точка A перемещается в направлении окружной скорости на расстояние

$$\Delta l_u = c_{cu} \Delta t = \frac{c_{cu} dr}{w \sin \beta}, \quad (11)$$

а в направлении скорости c_c

$$\Delta l = c_c \Delta t = \frac{c_c dr}{w \sin \beta}. \quad (12)$$

Выразим скорость перемещения среды через ее угловую скорость ω_s :

$$c_{cu} = \omega_s r. \quad (13)$$

Работа рассматриваемых сил равна их произведению на соответствующий путь перемещения среды

$$dA = F_u \Delta l = 2m\omega_s \frac{r dr}{\sin^2 \beta}; \quad (14)$$

$$dA_u = F_u \Delta l_u = 2m\omega_s r dr; \quad (15)$$

$$dA_r = F_r dr = 2m\omega_s \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} r dr. \quad (16)$$

Интегрированием в пределах от r_1 до r_2 при условии постоянства угла наклона лопастей ($\beta = \beta_1 = \beta_2$) по радиусу колеса и угловой скорости среды ($\omega_s = \text{const}$) получены выражения соответствующих работ:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} 2m\omega_s \frac{r dr}{\sin^2 \beta} = \frac{m\omega_s}{\sin^2 \beta} (r_2^2 - r_1^2); \quad (17)$$

$$A_u = \int_{r_1}^{r_2} 2m\omega_s r dr = m\omega_s (r_2^2 - r_1^2); \quad (18)$$

$$A_r = \int_{r_1}^{r_2} 2m\omega_s \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} r dr = m\omega_s \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} (r_2^2 - r_1^2). \quad (19)$$

Произведение угловой скорости колеса на входной и выходной радиусы представляет собой соответствующие окружные скорости ($\omega r_1 = u_1$, $\omega r_2 = u_2$), а для входа среды в колесо и выхода из него приняты равенства $\omega_s r_1 = c_{1cu}$, $\omega_s r_2 = c_{2cu}$.

С учетом этих особенностей формулы (17)–(19) принимают вид

$$A = \frac{m}{\sin^2 \beta} (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}); \quad (20)$$

$$A_u = m (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}); \quad (21)$$

$$A_r = m \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}). \quad (22)$$

Давление, создаваемое лопастями рабочего колеса, представляет собой удельную работу, отнесенную к единице объема

$$P = \frac{\rho}{\sin^2 \beta} (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}) ; \quad (23)$$

$$P_u = \rho (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}) ; \quad (24)$$

$$P_r = \rho \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} (u_2 c_{2cu} - u_1 c_{1cu}) . \quad (25)$$

Найденные выражения идентичны формулам (4)–(6), полученным ранее [4]. При отсутствии закручивания потока среды на входе в рабочее колесо ($c_{1cu} = 0$) зависимости (23)–(25) упрощаются.

Сложением формул (24) и (25) выводится выражение (23), что подтверждает справедливость проведенных вычислений. Однако такая закономерность справедлива только при углах наклона лопастей до 90° . При больших углах β радиальная составляющая реакции колеса F_r направлена к оси вращения и снижает общее давление, развиваемое нагнетателем. В этом случае функция $\cos \beta$ имеет отрицательное значение, но в зависимости (25) она возводится в квадрат, и в целом выводится положительная величина работы. Поэтому при больших углах β для определения давления, создаваемого реакцией лопастей, из выражения (24) необходимо вычесть (25).

Закключение. В ходе проведенного исследования при использовании удельной работы, приходящейся на единицу объема среды, получены зависимости давления, которые идентичны формулам, полученным ранее при использовании мощности, передаваемой среде колесом. Давление, создаваемое реакцией колеса по преодолению силы инерции среды в радиальном направлении, при углах $\beta < 90^\circ$ увеличивает, а при $\beta > 90^\circ$ снижает общее давление нагнетателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971.
3. Поляков, В.В. Насосы и вентиляторы / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. – М.: Стройиздат, 1990.
4. Павлечко, В.Н. Влияние ускорения Кориолиса на напор радиального нагнетателя / В.Н. Павлечко // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–29 нояб. 2013 г. – Минск: БГТУ, 2013. – С. 166–170.

Поступила 17.03.2014

ON THE THEORETICAL PRESSURE A RADIAL BLOWER TAKING INTO ACCOUNT THE CORIOLIS FORCE

V. PAVLECHKO, S. PRATASAU

The dependences for calculation of theoretical pressure created by an impeller of a radial blower are analyzed. The dependences consider the difference of peripheral speeds of the impeller and of the media, the response of the blades to the inertial force of the media in various directions and the power required for displacement of the media. The equations taking into account the work carried out by the blades are derived for determination of the pressure. The obtained equations are identical to the derived earlier equations considering power transferred to the media by the blades. It was found that the total radial pressure created by the impeller increases at the blade angle below 90° and decreases at blade angle above 90° .

УДК 621.693

**ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛОВ НАПЛАВКОЙ
С УЧЕТОМ ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ;
канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК;
канд. техн. наук Т.В. ВИГЕРИНА
(Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты проведенного анализа химического состава материалов, используемых для восстановления валов из среднеуглеродистой стали наплавкой. Получена теоретическая зависимость величины осевой деформации элементов наплавляемого вала от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материалов восстанавливаемого изделия и покрытия, размеров наплавленного валика, на основании которой можно прогнозировать изменение осевого размера вала и ограничить количество наплавки. Определяющее влияние на остаточные напряжения оказывают температура нагрева материала покрытия и температурный коэффициент линейного расширения. В меньшей степени влияет соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки.

Введение. Основными требованиями к деталям типа «вал» являются точность геометрических параметров рабочих поверхностей и высокие износостойкость и усталостная прочность шеек. Около 30 % валов изготавливают из среднеуглеродистой стали [1]. При эксплуатации деталей сопротивление их усталости снижается на 25...30 % [2], неизбежными явлениями также являются износ коренных и шатунных шеек. Наиболее доступный и экономически обоснованный способ восстановления шеек стальных валов при износе и наличии технологических трещин длиной не более 10...12 мм и глубиной до 3 мм, расположенных под углом менее 20° к оси вала, – наплавка легированными материалами с последующей термической и механической обработкой. Наплавка обладает высокой производительностью и позволяет получать покрытия из различных материалов, обладающих широким диапазоном свойств. Однако значительное тепловложение в материал заготовки приводит к образованию нежелательных закалочных структур, снижающих эксплуатационные характеристики деталей, в том числе предел их выносливости.

Максимальная износостойкость обеспечивается использованием гетерогенных покрытий. При наплавке происходит кристаллизация металла из легированного многокомпонентного расплава и формирование эвтектических слоев, содержащих избыточные фазы. Повышение износостойкости за счет увеличения твердости материала покрытия приводит к образованию на границе «основной металл – покрытие» микроструктур с повышенной твердостью, склонных к хрупкому разрушению.

Основными критериями при выборе наплавочного материала являются сварочно-технологические свойства, стоимость и механические характеристики нанесенного покрытия. Сплавы, которые рекомендуются для наплавки деталей [3], работающих в условиях трения скольжения, содержат основные легирующие элементы: хром, титан, бор, кремний, марганец. Если в качестве критерия качества полученного покрытия принять износостойкость, желательно использовать проволоку, легированную карбидообразующими элементами: бором, хромом, титаном. В результате наплавки такого материала получают износостойкое покрытие, имеющее эвтектоидную структуру с избыточными фазами, содержание которых зависит от количества легирующих элементов).

Хром – широко распространенный карбидообразующий элемент, имеющий сравнительно низкую стоимость. Легирование хромом снижает склонность аустенитного зерна к росту при нагреве, увеличивает прокаливаемость (за счет снижения скорости диффузии углерода) и замедляет распад мартенсита, а также способствует увеличению дисперсности структуры.

Титан образует прочные и тугоплавкие карбиды. Твердость монокарбида титана 28 ГПа, а температура плавления – 3150 °С. Наличие титана в стали уменьшает ее чувствительность к перегреву и способствует образованию мелкозернистой структуры. Титан увеличивает стойкость стали против водородной хрупкости, трещин и флокенов.

Высокая микротвердость боридов (12...37 ГПа) и малая растворимость бора в металлах обеспечивают значительное повышение твердости сплава. Наряду с обеспечением твердости, бор в составе эвтектических структур сильно охрупчивает сплавы. Охрупчивание особенно сильно наблюдается при совместном легировании бором и углеродом. При содержании бора 0,001...0,015 % масс. повышается прокаливаемость, а следовательно эффективность термообработки. Повышенная активность бора при его избытке выше предела растворимости приводит к образованию карбидов и боридов в наплавленном слое, т.е.

к упрочнению стали. Также он оказывает раскисляющее воздействие, а при его значительном количестве образуются трещины [4].

Использование карбидообразующих элементов, таких как хром, титан и молибден, значительно повышает износостойкость наплавленных покрытий.

Наличие кремния и марганца при наплавке приводит к интенсификации протекания реакций их восстановления, что снижает количество кислорода в металле.

Легирование железа марганцем до 12 % повышает износостойкость, а также твердость и микро-твердость. Прокаливаемость марганцевых сталей увеличивается вследствие снижения критических точек из-за замедленной диффузии углерода в аустените. Однако марганец при содержании в больших количествах ухудшает наплавляемость, способствуя образованию горячих трещин.

С учетом результатов проведенного анализа в качестве изучаемого наплавочного материала предложены проволоки ПП-Нп-80Х20РЗТ и Св-08Х13 с различным содержанием углерода и легирующих элементов. Использование проволоки У7 позволяет получить твердое покрытие без карбидов и тем самым увеличить износостойкость покрытия.

Наплавку хромистыми сталями ведут с целью повышения коррозионной стойкости и придания поверхностным слоям изделия высокой износостойкости. Важной особенностью покрытий из хромистых сталей является сохранение свойств при высокой температуре. При низком содержании углерода хромистый наплавленный материал имеет мартенситно-ферритную структуру и твердость 32...35 HRC.

Наплавочные материалы, используемые для нанесения износостойких покрытий, обеспечивают покрытиям высокие твердость и износостойкость, что в значительной степени затрудняет их обработку резанием. Твердость покрытий из проволоки ПП-Нп-80Х20РЗТ составляет 45...48 HRC, а после закалки 55...60 HRC. Наплавка порошковой высокоуглеродистой проволокой позволяет повысить твердость наплавленного покрытия до HRC 45...50 и получить гетерогенную структуру – «матрица + твердые включения», оптимальную с точки зрения обеспечения износостойкости.

Наплавка приводит к появлению в металле внутренних остаточных напряжений и связанных с ними деформаций. Эти напряжения возникают вследствие неравномерности нагрева металла, а также из-за его структурных превращений. При наплавке низкоуглеродистыми сталями структурные превращения отсутствуют, поэтому имеют место лишь тепловые напряжения. Как правило, материал наплавленного покрытия сильно отличается от основного по химическому составу. При наплавке покрытия на вал из-за деформации и напряжения существенное влияние оказывает разница в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) основного и наплавленного металлов, а также увеличение объема хромистой стали вследствие ее закалки при охлаждении на воздухе. В наплавленном покрытии возникают остаточные напряжения, достигающие 700 МПа [5]. Среднее уменьшение длины коленчатого вала, установленное по данным измерений групп валов из 15...20 единиц, достигает 3 мм, что можно объяснить возникновением внутренних напряжений в материале покрытия и детали.

Таким образом, помимо формируемой микроструктуры покрытий, обеспечивающих эксплуатационные свойства деталей, необходимо учитывать и физико-механические свойства наносимых материалов и материала детали.

Цель работы – анализ влияния химического состава материала покрытия, наносимого на шейки валов при их восстановлении наплавкой, и получение зависимости, позволяющей учитывать влияние физико-механических свойств материалов основы и покрытия на деформацию восстанавливаемой детали.

Методика проведения исследований. Изучение влияния физико-механических свойств наплаваемого материала на восстанавливаемые детали проводилось при исследовании покрытий, полученных наплавкой проволокой Нп-40Х13, Св08Х13 и У7. Покрытие наплавляли на коренные шейки валов (материал – сталь 45) в среде [Ar + (20...30 % CO₂)].

Определение распределения температуры материала как на поверхности, так и в глубине деталей осуществляли моделированием наплавочных процессов на компьютере, которое реализовывалось с использованием T-FLEX-анализа, все расчёты в данной программе велись с применением метода конечных элементов. При этом между трёхмерной моделью изделия и расчётной конечно-элементной моделью поддерживалась ассоциативная связь. Параметрические изменения исходной твердотельной модели автоматическим образом переносились на сеточную конечно-элементную модель.

В работе использовался тепловой анализ, модель которого обеспечивает возможность оценки температурного поведения изделия под действием источников тепла. Тепловой анализ использовался самостоятельно для расчёта температурных или тепловых полей по объёму конструкции, а также совместно со статическим анализом для оценки возникающих в изделии температурных деформаций.

При постановке задачи в T-FLEX-анализе задавался нестационарный процесс – расчёт температурных полей осуществлялся в функции времени. При подготовке задачи задавались геометрические параметры моделируемой системы, строилась конечно-элементная сетка, аппроксимирующая геометрию конструкции.

Результаты исследований и их обсуждение. При наплавке детали нагрев наплавляемого материала и материала основы сосредоточенным источником тепла (дугой) и быстрое охлаждение расплавленного металла со скоростью в десятки и сотни градусов в секунду предшествует кристаллизации наплавленного материала. Часть тепла из зоны сплавления наплавленного материала и материала восстанавливаемой заготовки отводится вглубь заготовки. При охлаждении покрытия в нем возникают остаточные растягивающие напряжения в направлении, противоположном усадке, которые оказывают значительное влияние на образование трещин. Напряжения появляются в результате неравномерного нагрева наплавляемого материала и материала восстанавливаемой детали. Повышение скорости охлаждения наплавленных слоев сопровождается ростом напряжений, поэтому регулирование кристаллизации для измельчения структуры за счет повышения скоростей охлаждения неприемлемо. Для уменьшения растягивающих напряжений используют предварительный подогрев восстанавливаемой детали, который снижает скорость охлаждения наплавленного покрытия.

При необезличенном ремонте двигателей их коленчатые валы до шести раз подвергаются нанесению покрытий, что установлено по контрольным меткам, оставляемым рабочими на щеках валов при каждом нанесении покрытия. Наплавка и напыление покрытий с использованием источников тепла уменьшают длину восстанавливаемого вала из-за неодновременного нагрева и охлаждения участков детали и покрытия. Это особенно заметно для наплавленных валов, в сравнении с напыленными валами, так как для первых характерен нагрев до большей температуры с расплавлением поверхностных слоев металла восстанавливаемых шеек. Среднее уменьшение длины, установленное по данным измерений групп валов из 15...20 единиц с помощью штангенциркуля с ценой деления 0,1 мм, отображено на рисунке 1. В каждую группу входили валы с одинаковым числом наплавов шеек.

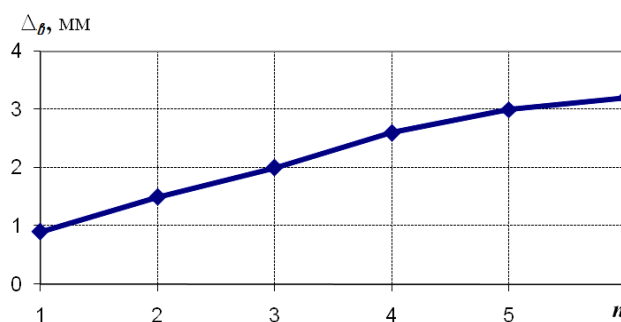


Рис. 1. Среднее уменьшение длины коленчатых валов $\Delta\delta$ от числа наплавов n

Длина коленчатых валов после нескольких наплавов уменьшается до 3 мм за счет возникновения внутренних напряжений в материале покрытия и детали. В практике ремонта бывали случаи, когда восстановленный коленчатый вал невозможно было установить в блоки цилиндров при сборке двигателей. От восстановления к восстановлению длина наплавленной детали уменьшается [6].

При наплавке теплота вводится в изделие через катодное пятно нагрева. В нашем случае при восстановлении наплавкой источником теплоты является электрическая дуга – этот источник теплоты считается поверхностным, сила тока $I = 170$ А, напряжение $U = 30$ В, время наплавки одного валика $t = 40$ с. Моделирование наплавочных процессов на компьютере позволило получить графическое изображение температуры материала на его поверхности при наплавке (рис. 2).

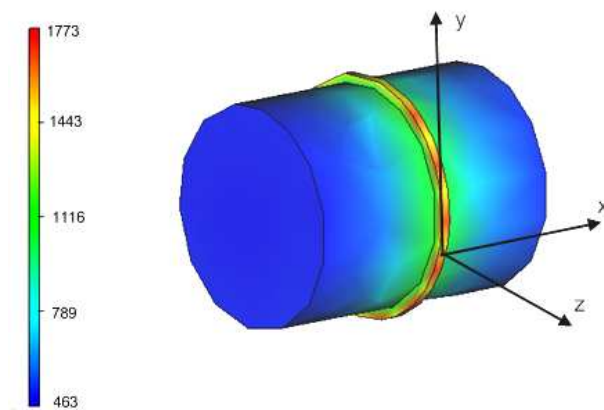


Рис. 2. Распределение температурного поля при наплавке

Для расчета деформаций в материале восстанавливаемой детали и валике наплавленного металла и внутренних напряжений в них были приняты следующие допущения:

- наплавляемый валик металла представляет собой тороидальное кольцо эллиптического сечения, имеющий металлическую связь с металлом заготовки;
- сечение валика представляет собой эллипс с осями a и b ;
- напряжения в поперечных сечениях наплавленного валика и основы деталей распределены равномерно;
- температура нагрева валика значительно выше температуры нагрева материала заготовки;
- расплавленный металл валика после нанесения кристаллизуется и охлаждается до комнатной температуры;
- взаимодействие валика с основным металлом наступило после его нанесения;
- коэффициент Пуассона μ в расчетах не учитывается.

За счет охлаждения металла валика, его размеры, в том числе ширина b , будут уменьшаться, чему препятствует участок детали диаметром $(d - a)$ и длиной b под валиком (рис. 3).

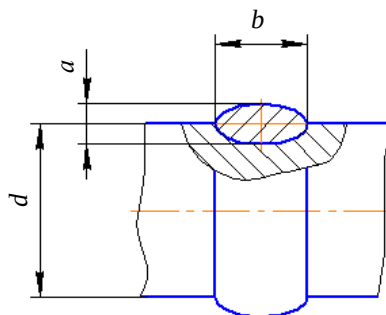


Рис. 3. Схема шейки детали с наплавленным валиком материала

Материал валика в направлении оси детали будет растянут под действием силы $P_{рс}$, а материал шейки детали под валиком сжат под действием силы $P_{сж}$ (рис. 4).

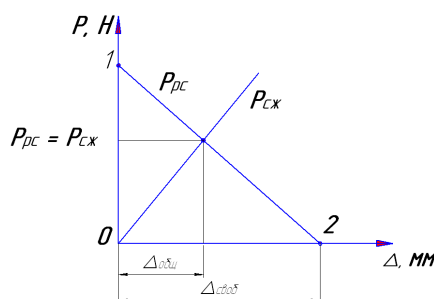


Рис. 4. Воздействие силы $P_{рс}$, растягивающей покрытие, и силы $P_{сж}$, сжимающей основной материал детали, в зависимости от деформации Δ (P – силы, возникающие при взаимодействии основы и покрытия в результате наплавки)

Деформация материала валика $\Delta_{своб}$ (м) вдоль оси детали при охлаждении в отсутствии сопротивления со стороны материала детали равна

$$\Delta_{своб} = b \cdot (t_n - t_k) \cdot \alpha, \text{ мм}, \quad (1)$$

где t_n и t_k – температура нагрева материала покрытия и комнатная температура соответственно, К; α – температурный коэффициент линейного расширения, $1 / \text{К}$.

При сопротивлении со стороны детали, когда длина сечения валика останется без изменения, напряжения растяжения σ_p в материале валика достигнут значения

$$\sigma_p = \frac{\Delta_{своб}}{b} \cdot E_\sigma, \text{ Па}, \quad (2)$$

где E_σ – модуль упругости первого рода для материала валика, Па.

Растягивающая сила P_{pc} в материале покрытия при деформации, равной $\Delta_{своб}$, составит

$$P_{pc} = \sigma_p \left[\frac{\pi \cdot (d+a)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d-a)^2}{4} \right] = \sigma_p \cdot \pi \cdot d \cdot a. \quad (3)$$

Зависимость силы P_{pc} от деформации Δ в виде уравнения прямой, проходящей через две точки 1 и 2 (см. рис. 4), находим из условий:

- координаты точки 1: $\left[0; (t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot a \right],$

- координаты точки 2: $\left[\Delta_{своб}; 0 \right],$

- уравнение прямой:

$$\frac{\Delta - 0}{\Delta_{своб} - 0} = \frac{P_{pc} - (t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot a}{0 - (t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot a}, \quad (4)$$

откуда

$$P_{pc} = \frac{(t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E_s \cdot \pi \cdot d \cdot a - \Delta \cdot E_s \cdot \pi \cdot d \cdot a}{b} = \frac{E_s \cdot \pi \cdot d \cdot a}{b} \cdot [(t_n - t_k) \cdot b \cdot \alpha - \Delta]. \quad (5)$$

Сила $P_{сж}$ зависит от деформации Δ следующим образом:

$$P_{сж} = \frac{\Delta}{b} \cdot E_d \cdot \frac{\pi \cdot (d-a)^2}{4}, \text{ Н}, \quad (6)$$

где E_d – модуль упругости первого рода для материала детали, Па.

Равновесие фрагмента детали имеет место при следующем равестве:

$$P_{pc} = P_{сж}, \quad (7)$$

откуда

$$\frac{E_s \cdot \pi \cdot d \cdot a}{b} \cdot [(t_n - t_k) \cdot b \cdot \alpha - \Delta] = \frac{\Delta}{b} \cdot E_d \cdot \frac{\pi \cdot (d-a)^2}{4}. \quad (8)$$

Решаем уравнение относительно Δ

$$\Delta = \frac{E_s \cdot d \cdot a \cdot (t_n - t_k) \cdot b \cdot \alpha}{\left(E_s \cdot d \cdot a + \frac{E_d \cdot (d-a)^2}{4} \right)}, \text{ м}. \quad (9)$$

Деформация одной шейки вала при наплавке проволоки Св-08Х13 ($\Delta = 0,01151$ мм) меньше, чем при наплавке проволоки У7 ($\Delta = 0,01365$ мм).

Как показывает полученная зависимость, определяющее влияние на деформацию, а следовательно и на остаточные напряжения, оказывает температура нагрева материала покрытия и ТКЛР. Меньшее влияние оказывает соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки. Поэтому при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением ТКЛР, а нанесение покрытий вести с минимально возможной температурой. Расчеты показывают, что при наплавке десяти шеек вала уменьшение его длины составляет 0,8 мм, что соответствует данным инструментальных измерений. Имея деформации элементов детали и покрытия, их размеры и модули упругости, можно рассчитать напряжения в них вдоль оси детали.

Вывод. При выборе материала для восстановления стальных валов наплавкой, помимо его химического состава, необходимо учитывать и физико-механические свойства, которые оказывают влия-

ние на геометрические размеры восстанавливаемой детали, например, при неоднократной наплавке шеек коленчатого вала возможно уменьшение его длины до 3 мм.

Полученная теоретическая зависимость величины осевой деформации элементов стального коленчатого вала, возникающей при наплавке, от модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения материалов детали и покрытия, температуры нагрева материала покрытия и размеров наплавленных валиков позволяет прогнозировать изменение длины коленчатого вала после каждой наплавки и обоснованно ограничивать их количество.

Определяющее влияние на деформацию, а следовательно, и на остаточные напряжения оказывает температура нагрева материала покрытия и ТКЛР. В меньшей степени влияет соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки. Поэтому при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением ТКЛР, а нанесение покрытий вести с минимально возможной температурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошевич, В.К. Коленчатые валы автомобильных двигателей / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский, Е.Л. Савич. – Минск: БНТУ, 2004. – 176 с.
2. Сидоров, А.И. Восстановление коленчатых валов тракторных двигателей плазменной наплавкой / А.И. Сидоров, К.А. Ильясов // Сварочное производство. – 1983. – № 4. – С. 38–40.
3. Бурумкулов, Ф.Х. Оценка триботехнических характеристик коленчатых валов, восстановленных установкой полуколец / Ф.Х. Бурумкулов, В.Е. Блох // Труды ГОСНИТИ / ГОСНИТИ. – М., 1992. – Т. 92: Восстановление деталей и техническое обслуживание машин, используемых в сельском хозяйстве. – С. 3–25.
4. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.], под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
5. Лившиц, Л.С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
6. Вигерина, Т.В. Влияние наплавки на длину коленчатого вала при восстановлении / Т.В. Вигерина // Вестник БНТУ. – 2011. – № 6. – С. 14–18.

Поступила 30.06.2014

THE CHOICE OF MATERIAL FOR THE RESTORATION OF GROSS SURFACING IN VIEW OF ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

V. IVANOU, A. KASTRUK, T. VIGERINA

In the article the results of the analysis of the chemical composition of the materials used for the restoration of the shafts of medium carbon steel welding are presented. Theoretical dependence of the axial deformation of the weld shaft of the elastic modulus, the heating temperature and the temperature coefficient of linear expansion of the materials recovered products and coatings, bead size, on the basis of which it is possible to predict the change in the axial dimension of the shaft and limit the number of weld overlays are obtained. Decisive influence on the residual stresses have a heating temperature of the coating material and the temperature coefficient of linear expansion. To a lesser extent affected by the ratio values of the modulus of elasticity of the coating and the workpiece material.

УДК 621.762

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫМИ ШНУРАМИ НА СВОЙСТВА ФОРМИРУЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

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

Представлены результаты экспериментальных исследований нового процесса формирования покрытий – газопламенного распыления полимерных шнуров и экструдатов. Для нанесения покрытий разработан газопламенный термораспылитель с камерой сгорания оригинальной конструкции. Оборудование обеспечивает нагрев и диспергирование полимерного шнура одной и той же струей газа. Показано, что режимы формирования покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров оказывают существенное влияние на структуру полимера, прочность сцепления покрытий, антифрикционные свойства. Определены технологические режимы напыления, при которых покрытия обладают наибольшей прочностью сцепления. Максимальные значения адгезии соответствуют нейтральному пламени с небольшим избытком окислителя, то есть на 1 объем пропана в смеси приходится 24...26 объемов воздуха. С повышением содержания окислителя в составе горючей смеси факела наблюдается увеличение размера надмолекулярных образований. Установлено, что на величину коэффициента использования материала наибольшее влияние оказывает давление в камере сгорания термораспылителя.

Введение. В последние годы во всех промышленно развитых странах интенсивно разрабатываются технологии создания композиционных материалов на основе полимеров и методы нанесения покрытий из них. Полимерные покрытия используются для защиты деталей от коррозии и изнашивания, электрической изоляции и герметизации соединений. Их способность гасить колебания и малая удельная масса используются при конструировании широкого спектра механических систем. Все большее практическое применение находит также метод нанесения защитных покрытий газопламенным распылением полимерных экструдатов и шнуров, разработанный в ОИМ НАН Беларуси [1–3]. Успешное развитие этой технологии обусловлено прежде всего тем, что в сравнении с нанесением полимерных порошков распыление шнуров обеспечивает большую стабильность свойств покрытий, лучшее распределение наполнителя, особенно наноразмерного [4], меньшую себестоимость.

В данной работе представлены результаты исследований метода газопламенного распыления полимерных шнуров и, в частности, выполнена оценка влияния состава горючей смеси, дистанции напыления и скорости охлаждения на структурные изменения полимера и физико-механические свойства наносимых слоев. Полученные данные используются авторами при разработке технологических процессов формирования коррозионно-стойких и антифрикционных покрытий газопламенным напылением шнуров из термопластов.

Оборудование и методики проведения исследований. Нанесение покрытий осуществляли с использованием газопламенного термораспылителя оригинальной конструкции, снабженного специальной камерой сгорания (рис. 1), позволяющего распылять шнуры и экструдаты диаметром 3 мм из термопластичных полимеров [5]. При этом процесс нагрева и диспергирования полимерного шнура осуществляется одной струей газа.

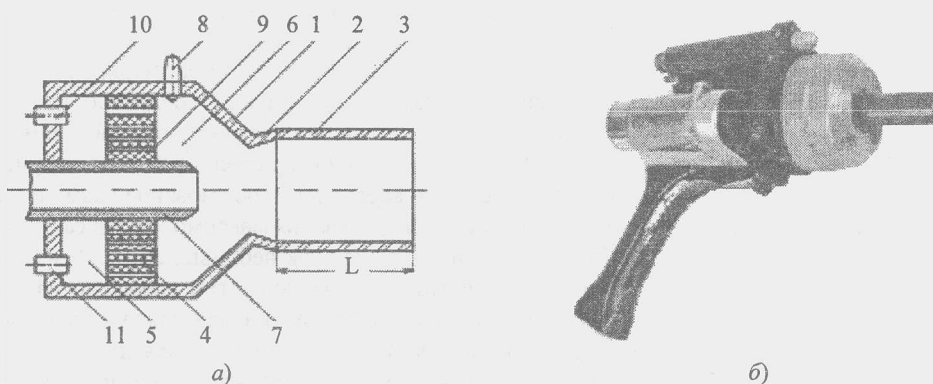


Рис. 1. Схема (а) камеры сгорания (пат. Респ. Беларусь 2996) и внешний вид (б) термораспылителя:
1 – корпус; 2 – выходное сопло; 3 – цилиндрический патрубок сопла; 4 – огнеупорный перфорированный элемент;
5 – полость смешения газов; 6 – полость горения газовой смеси; 7 – мундштук; 8 – устройство поджига рабочей смеси;
9 – огневая поверхность перфорированного элемента; 10 и 11 – топливный и воздушный жиклеры

В экспериментах использовались шнуры из полиамида ПА 6, полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и полиэтилена низкого давления (ПЭНД). В качестве модифицирующего наполнителя использовалась ультрадисперсная алмазно-графитовая смесь (УДАГ) в количестве 0,1...0,2 мас. %. Покрывают наносили на образцы из низкоуглеродистой стали при различных составах горючей смеси, скорости охлаждения и дистанции напыления. Морфологию, химический состав покрытий и надмолекулярную структуру полимера в покрытиях оценивали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201. Фазовый состав полимера в покрытии идентифицировался методом рентгеноструктурного анализа на установке ДРОН-3 в монохроматизированном $\text{CoK}\alpha$ -излучении.

Прочность полимерных покрытий к металлической поверхности, подготовленной струйно-абразивным методом с удельной энергией потока 70...150 кДж/с·м² и размером частиц 0,8...1,5 мм, исследовали методом отрыва штифта нормально приложенной нагрузкой. Внутренние напряжения в полимерном слое оценивали консольным методом [6].

Результаты исследований и их обсуждение. На первом этапе исследований было оценено влияние технологических режимов напыления на химический состав, строение, фазовое и физическое состояние, морфологию и степень упорядоченности физической (надмолекулярной) структуры полимера в покрытии.

Установлено, что степень кристалличности полимера в нанесенном покрытии зависит в наибольшей степени от скорости охлаждения. Дифрактограммы, полученные при различных скоростях охлаждения покрытия, содержат рефлексы от кристаллического полиамида и диффузное гало под ними (рис. 2).

Качественное исследование первичной кристалличности (аморфно-кристаллического состояния) состава покрытий показало, что полимер в покрытии, полученном с медленным охлаждением, характеризуется относительно высокой степенью кристалличности, на что указывает присутствие в дифракционном спектре интенсивных линий от кристаллического полиамида (рис. 2, а). В случае быстрого охлаждения покрытия объемное содержание кристаллической фазы существенно снижается. Об этом свидетельствует уменьшение интенсивности дифракционных линий от кристаллического полиамида (рис. 2, б). Модификация полиамида наноразмерными добавками УДАГ даже при медленном охлаждении покрытий приводит к наиболее низкому содержанию кристаллической фазы (рис. 2, в). Исследование фазового состава покрытий, отожженных в течение 3 часов при температуре 0,7...0,8 от температуры плавления полиамида ПА 6 и медленно охлажденных, показало, что последующий нагрев покрытий приводит к уменьшению кристаллической фазы.

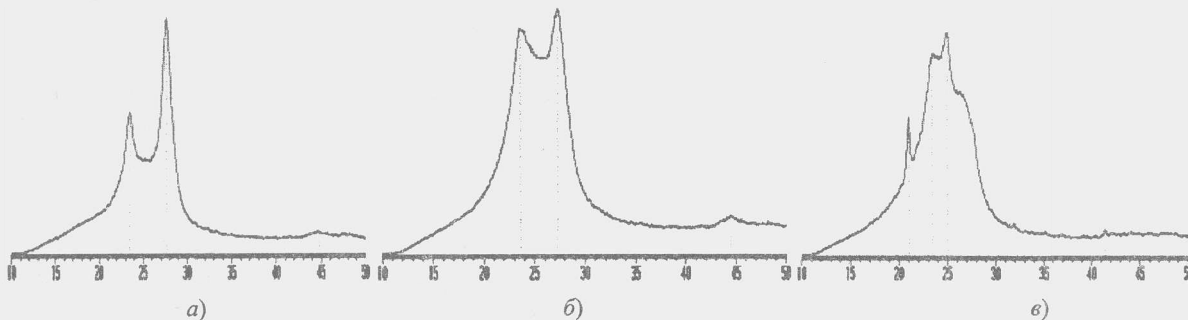


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ($\text{CoK}\alpha$) от покрытий полиамида ПА 6:

а – с медленным охлаждением; б – с быстрым охлаждением;

в – модифицированного 0,2 масс. % УДАГ, медленное охлаждение

Известно, что режим охлаждения влияет не только на первичную кристаллическую структуру полимеров, но в еще большей степени – на вторичную, надмолекулярную. Определено, что при медленном охлаждении покрытия из ПА 6 характеризуются надмолекулярной структурой, состоящей из линейных агрегатов в виде однородных по величине кольцевых сферолитов с размером 8...12 мкм (рис. 3, а).

При высоких скоростях охлаждения (закалке) этих же покрытий образование надмолекулярной структуры полимера завершается (останавливается) на стадии сворачивания макромолекул в сферические глобулы с неоднородным по размеру составом (рис. 3, б), присутствуют как небольшие (5...10 мкм), так и мелкие (2...4 мкм) образования глобулярного типа. Кроме этого у этих покрытий выявлено наличие большого количества макротрещин, вероятнее всего, проходящих по границам раздела между отдельными глобулами.

Анализируя надмолекулярные структуры в покрытиях, отличающихся лишь скоростью охлаждения, предположено, что путем регулирования режимами охлаждения можно получать либо кристаллическую структуру в полимере, характерную для пачек (сферолитов), либо аморфную структуру, характерную для глобул.

Оценка влияния состава горючей смеси на процессы образования первичной и вторичной кристаллической структуры показала, что изменения наблюдаются лишь при медленном охлаждении. При

этом они оказывают существенное влияние только на надмолекулярную структуру полимера. С повышением содержания окислителя в составе горючей смеси факела наблюдается увеличение размера надмолекулярных образований.

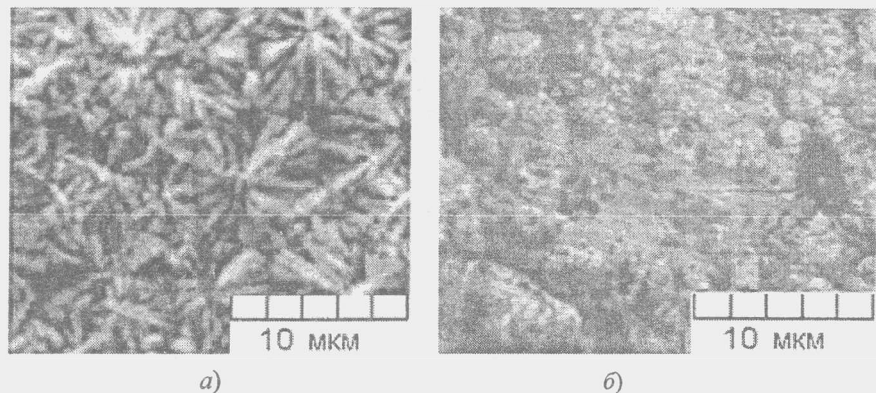


Рис. 3. Надмолекулярная структура полиамида ПА 6 в покрытии:
а – медленное охлаждение (воздух, 22 °С); б – быстрое охлаждение (вода, 8 °С)

Исследования структурных особенностей полимера в покрытии в зависимости от состава горючей смеси показали, что наибольшее (полное) совпадение атомных групп до и после распыления полиамида ПА 6 соответствует режиму распыления стехиометрическим составом горючей смеси, на что указывает инфракрасный спектр полос поглощения атомных групп. При этом число характеристических полос поглощения атомных групп и положение максимумов совпадает, изменяется лишь их интенсивность при некоторых волновых числах, что свидетельствует о сохранении физико-химических особенностей полимера в покрытии после его газотермического распыления.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о существенном влиянии содержания воздуха в горючей смеси (распыляющей струе газа) на адгезию покрытий при распылении немодифицированного полиамида (рис. 4). Это обусловлено изменением физико-химического и механического взаимодействия полимера с металлической подложкой. Изменение физико-химического взаимодействия является результатом изменения степени термического окисления полимерных макромолекул. С увеличением соотношения β происходит интенсификация процесса возникновения в полимере кислородсодержащих групп ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$ и др.). Известно [7], что для множества полимеров его окисление приводит к увеличению энергии взаимодействия полимер – металл. Кроме этого было установлено, что с увеличением степени окисления полимерного расплава увеличивается размер надмолекулярных образований, что говорит об уменьшении вязкости и силе поверхностного натяжения расплава. Данное обстоятельство способствует увеличению энергии взаимодействия полимера с подложкой, за счет повышения процесса смачивания.

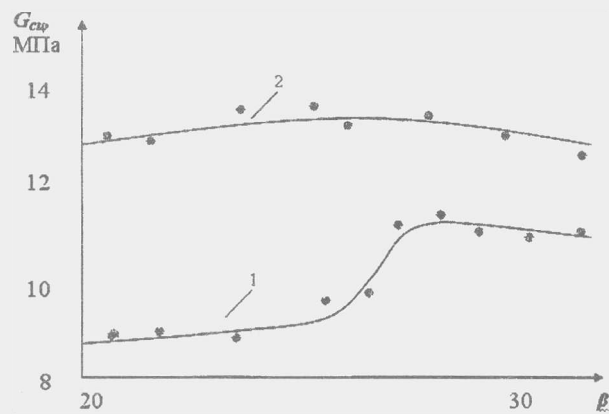


Рис. 4. Влияние соотношения объема воздуха к объему горючего газа в смеси (β) на адгезию покрытий:
1 – ПА 6; 2 – ПА 6 + 0,2 мас. % УДАГ

Механическое взаимодействие полимера с металлом заключается в проникновении полимерного расплава в неровности, поры металла и последующее заклинивание затвердевшего полимера в них. Вследствие некоторой вязкости расплава полного заполнения дефектов поверхности металла расплавом не

происходит, контакт адгезива с субстратом не может быть абсолютным. С изменением количества воздуха в распыляющей струе газа происходит изменение ее термодинамических параметров, что в свою очередь влияет на кинетику проникновения расплава в дефекты металлической поверхности. Увеличение скорости струи газа повышает энергию удара полимерных частиц и избыточное давление на образующийся слой расплава, происходит «вдавливание» расплава с сопровождающимся вытеснением макрообъемов адсорбированных веществ (газы, пары воды, органические вещества и др.) с поверхности подложки. Это обуславливает увеличение площади соприкосновения расплава с покрываемой поверхностью и увеличение взаимодействия реакционноспособных поверхностных атомов металлов и полярных групп макромолекул полимера. Следует отметить, что наличие адсорбированных газов (пузырей) на поверхности подложки является потенциальным очагом разрушения адгезионной связи, так как около воздушных полостей на границе раздела происходит концентрация напряжений.

Химический анализ выделяющихся макрообъемов веществ с металлической поверхности, подготовленной струйно-абразивной обработкой, показал, что они представляют собой пузырьки воздуха. В связи с тем, что газонасыщенность покрытий, нанесенных восстановительным и окислительным пламенем, практически одинаковая (таблица), то можно сделать вывод, что газовые образования в покрытии не являются результатом окисления полимерных макромолекул, а представляют собой свободные объемы. Минимальное значение газонасыщенности покрытий наблюдается при использовании нейтрального пламени, что объясняется большей динамикой струи газа, приводящей к лучшему вытеснению из полимерного слоя газовых свободных включений.

Газонасыщенность покрытий в зависимости от вида пламени

Вид пламени	Значение β	Газонасыщенность покрытия, %
«Нормальное»	24	10...12
«Восстановительное»	19	24...26
«Окислительное»	30	26...28

Максимальные значения адгезии соответствуют нейтральному пламени с небольшим избытком окислителя, т.е. на 1 объем пропана в смеси приходится 24...26 объемов воздуха. При большем соотношении β воздух выполняет неоднозначную роль. С одной стороны, увеличивается интенсивность образования кислородсодержащих связей, обеспечивающих образование прочных связей с металлом, с другой – также увеличивается и энергия межмолекулярного взаимодействия, результатом чего является уменьшение подвижности макромолекул полимера и уменьшение контакта кислородсодержащих групп полимера и металла. Кроме этого, при увеличении количества избыточного (несгораемого) воздуха скорость высокотемпературной струи газа уменьшается, что приводит к уменьшению площади соприкосновения полимерного слоя с подложкой. Общим результатом является уменьшение адгезии.

При распылении экструдата из полиамида ПА 6, модифицированного 0,2 мас. % УДАГ, в сравнении с распылением экструдата из «чистого» ПА 6 отмечается существенное увеличение прочности сцепления формируемых покрытий, а также меньшее влияние состава горючей смеси на адгезию. Увеличение адгезии покрытий из модифицированного полимера объясняется прежде всего их меньшими внутренними напряжениями. Снижение напряжений обусловлено следующим. Во-первых, образованием пространственных лабильных физических связей адсорбционного типа между активными центрами полимерных макромолекул и активными фрагментами поверхностного слоя наполнителя. Это дает возможность релаксации перенапряжений на межфазной границе с одновременным сохранением эффективных связей полимера с поверхностью наполнителя при деформации композиций. Во-вторых, присутствие графита, имеющего ярко выраженную пластинчатую форму, образует ориентационную укладку структурных элементов полимера вдоль частичек наполнителя. Пластинчатое строение частиц графита обуславливает образование вблизи его поверхности фибриллярной структуры. Это приводит к параллельной укладке фибрилл друг относительно друга и в последующих слоях полимера, удаленных от поверхности наполнителя. Частицы графита, не являясь центрами образования вторичных надмолекулярных структур, способствуют параллельной укладке друг относительно друга структурных элементов полимера. Более низкие связи полимера с поверхностью графита по сравнению с активной поверхностью алмаза и фибриллярная, а следовательно и более эластичная, надмолекулярная структура обуславливают сравнительно низкие усадочные напряжения в таких покрытиях. В результате образуются более эластичные покрытия, характеризующиеся меньшими внутренними напряжениями.

Уменьшение влияния состава горючей смеси на адгезию модифицированных покрытий связано с тем, что наполнитель УДАГ способствует интенсификации термоокисления полимера. Следует отметить, что для покрытий из немодифицированного ПА 6 наблюдается адгезионный тип разрушения, а для покрытий из модифицированного ПА 6 – смешанный тип разрушения, представляющий собой разрушение как по границе, так и в объеме полимера.

Оценка зависимости адгезионных свойств покрытий от дистанции напыления показала, что максимальными значения прочности сцепления на отрыв обладают покрытия, напыленные на дистанции 0,06...0,14 м, что проиллюстрировано рисунком 5.

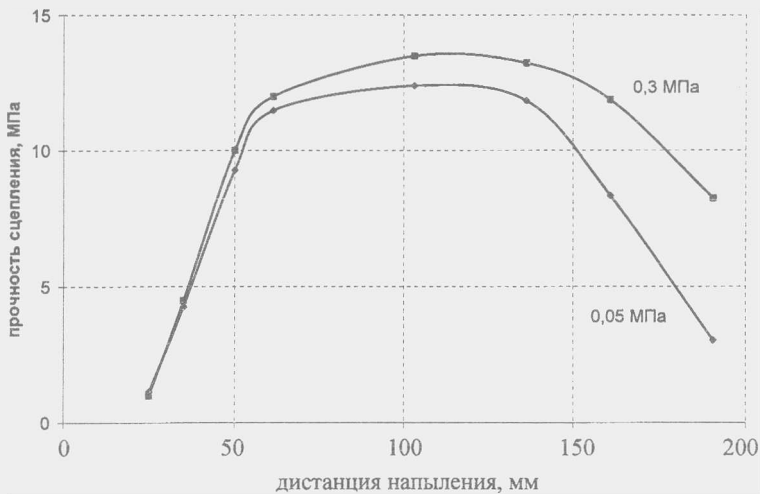


Рис. 5. Зависимость прочности сцепления покрытий от дистанции напыления при различном давлении горючей смеси в камере сгорания термораспылителя

Экстремальный характер полученных зависимостей обусловлен наличием оптимальных значений количества тепла, вложенного в полимерный материал. При меньших дистанциях напыления происходит перегрев полимерного расплава, подтверждением этому является существенное потемнение полимера на подложке. При дистанциях более 0,14 м покрытие формируется относительно «остывшими» частицами и сплавление происходит не в полной мере.

Одним из критериев технологичности процесса напыления покрытий являются значения коэффициента использования материала (далее – $K_{им}$). На рисунке 6 представлена зависимость $K_{им}$ от дистанции напыления при давлениях горючей смеси в камере сгорания 0,05 и 0,3 МПа.

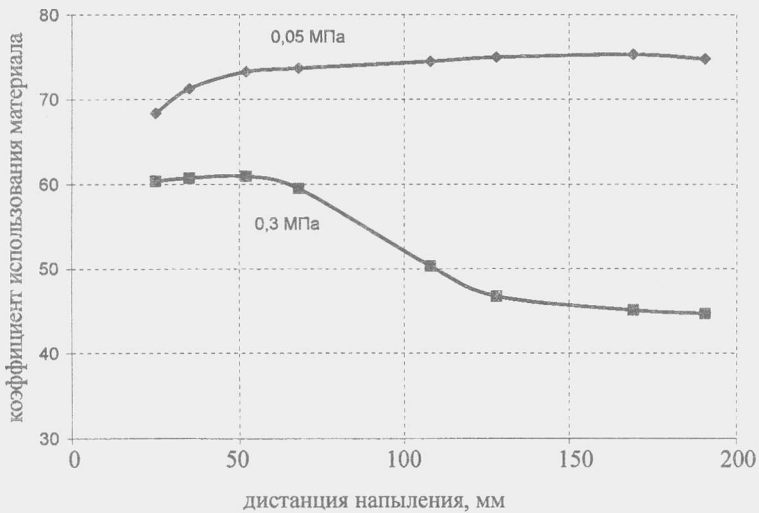


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования материала от дистанции напыления при давлениях в камере сгорания 0,05 и 0,3 МПа

Увеличение дистанции напыления для нижнего предела давления (0,05 МПа) способствует повышению $K_{им}$, а для верхнего предела давления (0,3 МПа) в общем случае способствует его уменьшению.

Зависимость $K_{им}$ от давления в камере сгорания объясняется влиянием давления на процесс диспергирования полимерной проволоки. Анализ продуктов диспергирования проволоки показал, что они представляют собой крайне неоднородные по размеру и форме образования. Одновременно присутствуют образования различных размеров в виде нитей (ламелей) и мелких частиц сферической формы (аэрозоль).

Установлено, что увеличение скорости охлаждения покрытий ПА 6 с 5 до 20 град/с практически не изменяет величину прочности сцепления со стальной подложкой, которая составляет 12...14 МПа. Дальнейшее повышение скорости охлаждения резко снижает величину адгезии, что, очевидно, связано со снижением степени кристалличности. Быстрое охлаждение расплава затрудняет протекание релаксационных процессов в полимере, что приводит к формированию более напряженных покрытий.

Заключение. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что режимы формирования покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров оказывают существенное влияние на структуру полимера – образуется либо кристаллическая, либо аморфная структура. Установлено, что при нанесении покрытий газопламенным распылением шнуров из полиамида ПА 6 увеличение степени кристалличности полимера в покрытии способствует повышению прочности сцепления. Определены технологические режимы нанесения покрытий, при которых покрытия обладают наибольшей прочностью сцепления. Для формирования покрытий с адгезией 12...14 МПа рекомендуется осуществлять процесс распыления нейтральным пламенем с небольшим избытком окислителя (на 1 объем пропана 25...27 объемов воздуха) при этом дистанцию напыления следует выдерживать 0,07...0,14 м и осуществлять охлаждение (кристаллизацию) покрытия со скоростью не более 20 град/с. Установлено, что на величину коэффициента использования материала оказывает влияние давление в камере сгорания термораспылителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ газопламенного напыления покрытий: пат. 10711 Респ. Беларусь, МПК В 05 D 1/08 / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. – № а 20050857; заявл. 31.08.05; опубл. 30.06.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 75.
2. Белоцерковский, М.А. Нанесение покрытий высокоскоростным газопламенным распылением полимерных шнуров / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 8. – С. 16–22.
3. Белоцерковский, М.А. Повышение долговечности узлов трения скольжения сельскохозяйственных машин газопламенным напылением полимерных покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев, А.И. Камко // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – №12. – С. 2–7.
4. Korobov, Yu. Modeling of Flame Spraying of Polymer Wire with Nanofillers / Yu. Korobov, M. Belotzerovski, A. Chekulaev // Mathematical modeling and computer simulation of material technologies / Int. Conf. MMT-2008, Israel, sept. 08–12, 2008. – Israel, 2008. – P. 2-65–2-71.
5. Устройство для газопламенного напыления проволоочных материалов: пат. 2996 Респ. Беларусь, МПК В 05 В 7/20 / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев, А.С. Прядко, В.М. Изойтко; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № 20060093; заявл. 17.02.06; опубл. 30.08.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 4. – С. 157.
6. Санжаровский, А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий // А.Т. Санжаровский. – М.: Наука, 1974. – 114 с.
7. Белый, В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич – Минск: Наука и техника, 1976. – 416 с.

Поступила 13.06.2014

INFLUENCE OF FLAME SPRAYING MODES OF POLYMER CORD ON THE PROPERTIES OF COATINGS FORMED

M. BELOTSEKOVSKY, A. CHEKULAEV

The article presents the results of experimental studies of the formation of new coatings – flame spraying of polymer cords and extrudates. Coating designed gas-flame thermal spraying with a combustion chamber of an original design. Hardware provides heating and dispersing polymeric cord of the same gas stream. It is shown that the modes of formation of coatings by flame spraying polymer cords have a significant impact on the structure of the polymer, the adhesion strength of coatings, anti-friction properties. Spraying process conditions are defined, in which the coatings have a maximum adhesion strength (12...14 MPa). The maximum adhesion values correspond to neutral flame with a slight excess of oxidant, i.e. to 1 volume of propane in a mixture accounts for 24...26 volumes of air. With increasing content of oxidant-fuel ratio is observed to increase the size of the torch supramolecular structures. It has been established that the value of utilization factor of the material having the greatest influence the combustion chamber pressure thermal spraying.

УДК 621.891.2

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК ПРИ ТРИБОВЗАИМОДЕЙСТВИИ И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА РЕСУРС УЗЛОВ ТРЕНИЯ

д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК

(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)

Представлен механизм эволюции структуры дисперсной фазы пластичного смазочного материала в процессе трибовзаимодействия пары трения. Показано, что разрушение пластичных смазок, модифицированных наноразмерными добавками, происходит на более поздних стадиях трибоконтакта по сравнению со стандартными смазками и обусловлено повышенной прочностью и улучшенной маслоудерживающей способностью бинарной дисперсной фазы модифицированных смазок. При этом освобождающиеся из структурного каркаса наноразмерные частицы противозадирных добавок продолжают обеспечивать высокую работоспособность смазочного материала на поздних стадиях трибовзаимодействия. Анализ структуры дисперсной фазы смазочного материала на любом этапе триботехнических испытаний или эксплуатации узла трения позволяет судить о работоспособности пластичной смазки и оценить ее остаточный ресурс.

Введение. Ресурс узлов трения машин и механизмов в значительной степени определяется работоспособностью применяемых смазочных материалов, среди которых широкое распространение получили пластичные смазочные материалы (ПСМ). В общем случае ПСМ можно рассматривать как двухкомпонентные коллоидные системы, в которых дисперсионная среда (75...95 мас. %) представляет собой масло, а дисперсная фаза (5...25 мас. %) – твердый загуститель, в качестве которого могут выступать соли высокомолекулярных карбоновых кислот, твердые углеводороды (парафин, церезин и т.п.), высокодисперсные неорганические (силикагель, бентониты, графит и т.п.) и органические (сажа, пигменты, полимеры, производные мочевины и т.п.) материалы с хорошо развитой удельной поверхностью, способные к структурообразованию в неводных средах [1]. Пластичные смазочные материалы являются высокоструктурированными тиксотропными дисперсиями, образованными трехмерным структурным каркасом дисперсной фазы, в ячейках которого капиллярными, адсорбционными и другими физическими связями удерживается дисперсионная среда (смазочное масло) [2].

Эффективными модификаторами смазочных материалов являются наноразмерные добавки различной природы, которые обладают структурирующими свойствами и могут обеспечить формирование бинарной дисперсной фазы, состоящей из наночастиц добавки и коротковолокнистых волокон загустителя и характеризующейся большей разветвленностью и повышенной маслоудерживающей способностью [3].

Целью настоящей работы являлось изучение эволюции структуры дисперсной фазы различных смазочных материалов, в том числе модифицированных наноразмерными добавками, в процессе трибоконтактирования пары трения и установление взаимосвязи между характером структуры дисперсной фазы пластичного смазочного материала и его работоспособностью.

Методика проведения исследований. Триботехнические испытания ПСМ проводилась на машине трения АТВП-2, работающей по схеме возвратно-поступательного перемещения контактирующих тел, по методике, изложенной в [4]. Испытания проводились на паре трения «металлопластмассовая лента DX1– сталь 40ХН» при удельной нагрузке 25, 50 и 75 МПа. Твердость поверхности трения контртела из закаленной стали 40ХН (50...52 HRC), показатель шероховатости поверхности Ra 0,32. Объектом исследования являлась дисперсная фаза литиевой смазки Литол-24 стандартного состава (ГОСТ 21150-75) и комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н с бинарной дисперсной фазой, содержащей наноразмерные алмазно-графитовые частицы [3], в исходном состоянии и на различных стадиях триботехнических испытаний при удельной нагрузке 50 МПа. Исследование структуры дисперсной фазы ПСМ осуществлялось с использованием средств сканирующей электронной микроскопии по методике [5].

Результаты исследований и их обсуждение. Смазка Литол-24 представляет собой простую литиевую смазку, в которой дисперсная фаза образована литиевой солью 12-гидрооксистеариновой кислоты и составляет 10 мас. %, а дисперсионной средой является индустриальное масло И-40. В смазке присутствует антиокислительная присадка ВНИИНП-357 в количестве 0,5 мас. %.

Смазка ИТМОЛ-150Н – комплексная литиевая смазка, в которой дисперсная фаза образована комплексной литиевой солью 12-гидрооксистеариновой и борной кислот и составляет 10 мас. %, а дисперсионной средой является индустриальное масло И-40. В смазку ИТМОЛ-150Н введены: твердые добавки (дисульфид молибдена (2 мас. %); диатомит (1 мас. %); перлит (1 мас. %); алмазно-графитовая шихта (0,1 мас. %)), также в ней присутствует антиокислительная присадка ВНИИНП-357 в количестве 0,5 мас. %.

Структура дисперсной фазы смазки Литол-24 в исходном состоянии представлена на рисунке 1.

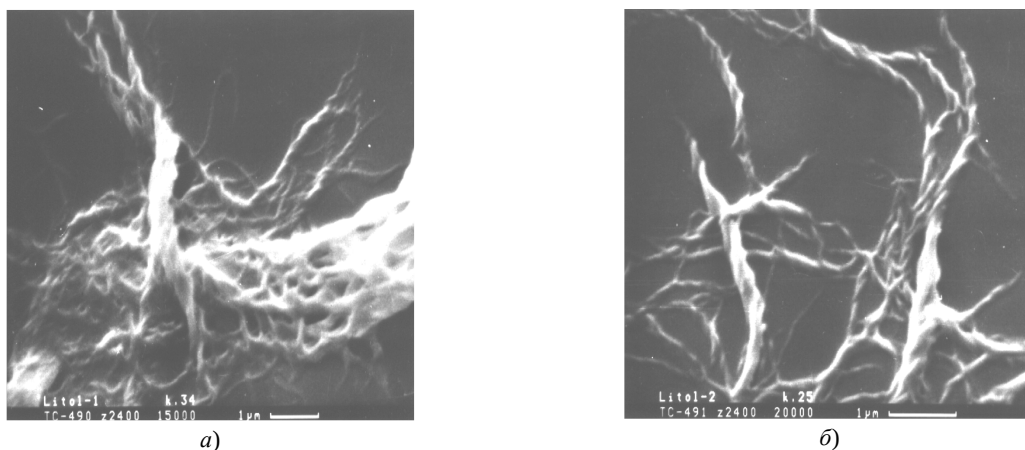


Рис. 1. Микроструктура дисперсной фазы смазки Литол-24 в исходном состоянии при различном увеличении

Как видно, дисперсная фаза имеет ярко выраженную волокнистую структуру. Волокна толщиной до 0,05 мкм сплетены в жгуты диаметром от 0,1 до 0,5 мкм, длина волокон превышает 10 мкм.

Исследование структуры дисперсной фазы смазки Литол-24 после триботехнических испытаний (путь трения – 10 км) показало, что в процессе трибоконтактирования структура дисперсной фазы претерпевает существенные изменения. При этом под деформационно-термическим воздействием происходит дробление ее волокон и их компактирование. Тонковолокнистая структура, характерная для исходной смазки Литол-24, после 10 км пути трения встречается только в отдельных местах (рис. 2, а, б). При этом волокна выпрямились и увеличились по толщине в 5 раз, кроме того, значительно укоротилась их длина. Образовавшиеся при трении конгломераты дисперсной фазы имеют уплотненную структуру с остатками волокнистого строения (рис. 2, в, г).

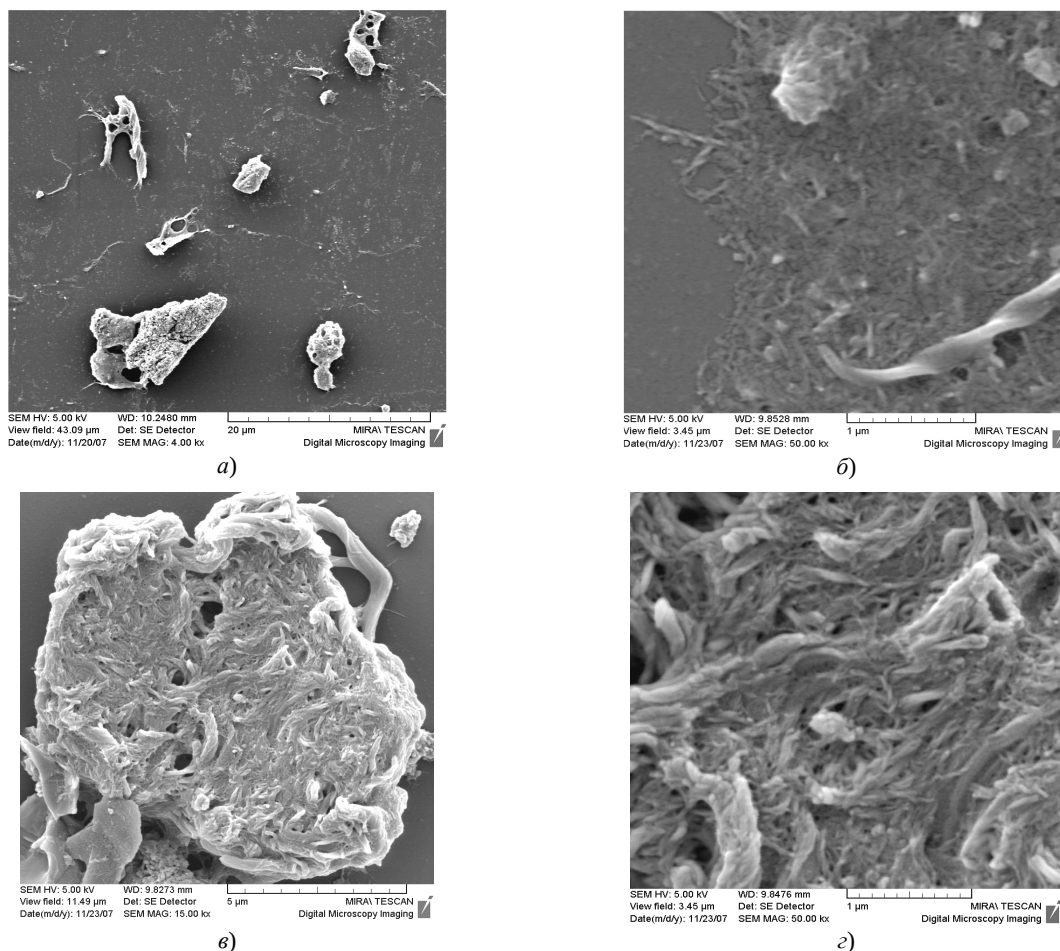
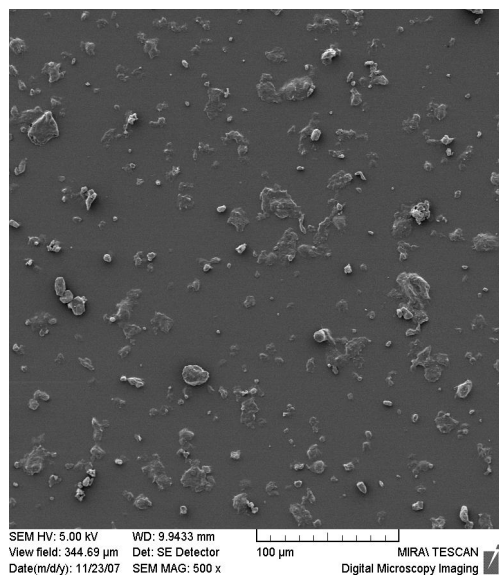


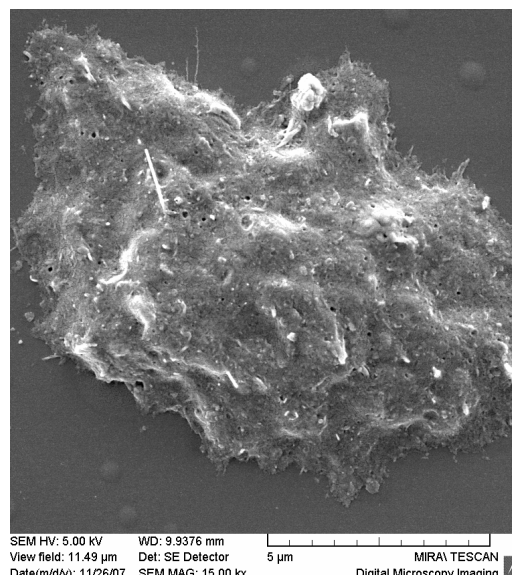
Рис. 2. Микроструктура смазки Литол-24 после 10 км пути трения при различном увеличении

После прохождения 15 км пути трения структура дисперсной фазы смазки Литол-24 выглядит еще более деградировавшей (рис. 3). В этом случае наблюдаются два вида структурных составляющих – «островки» и конгломераты. «Островки» представляют собой уплотненные образования из полностью разрушившихся волокон, которые распались на глобулы, заполненные дисперсионной средой (рис. 3, а, б).

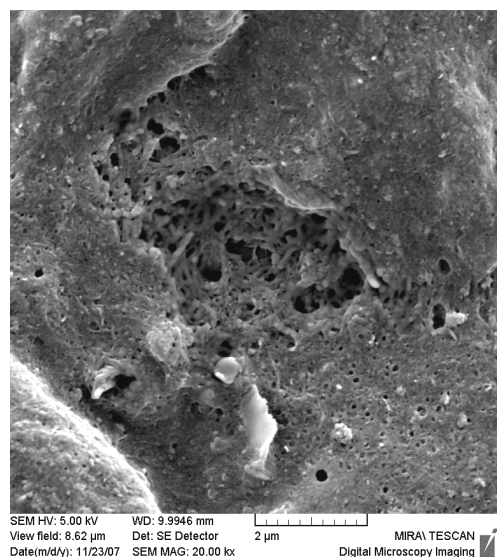
В конгломератах на отдельных участках еще сохранилась волокнистая структура (рис. 3, в, г), однако волокна значительно увеличились в размерах (толщина их не менее 0,5 мкм).



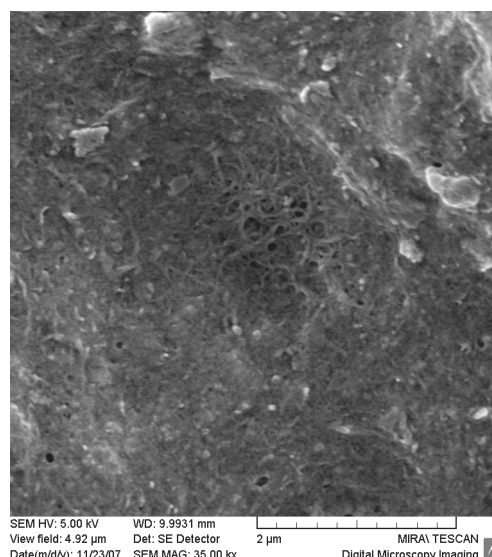
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Микроструктура смазки Литол-24 после 15 км пути трения при различном увеличении

Таким образом, в процессе работы пары трения пластичный смазочный материал испытывает в зоне трибоконтакта интенсивное деструктирующее воздействие, в результате которого происходит быстрое разрушение длинноволокнистой структуры дисперсной фазы простых литиевых смазок.

Структура дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок в исходном состоянии представлена на рисунке 4.

Как видно, структура дисперсной фазы представлена сложным комплексом прямых ровных волокон и включений добавок, оплетенных более мелкими волокнами.

Прямые волокна длиной 1...8 мкм и толщиной 0,1...0,5 мкм образованы комплексной литиевой солью 12-гидроксистеариновой и борной кислот.

Крупные включения имеют размеры 2...6 мкм и образованы введенными в смазку твердыми добавками дисульфида молибдена, диатомита, перлита и алмазно-графитовой шихты.

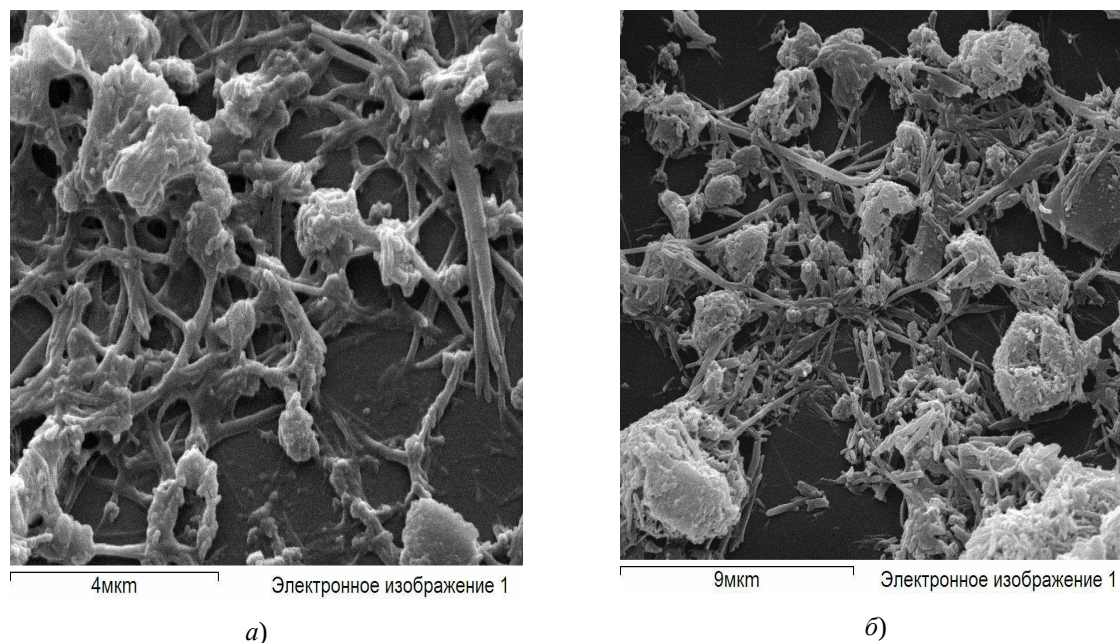


Рис. 4. Микроструктура дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом присадок в исходном состоянии при различном увеличении

Из представленных иллюстраций видно, что добавки оплетены волокнами комплексной соли. Данный эффект обусловлен специальным технологическим приемом модифицирования ПСМ наноразмерными добавками [3], предполагающим введение последних в состав смазочной композиции до начала процесса образования структуры дисперсной фазы. В результате поверхность добавок покрывается оболочкой структурированных комплексных солей, и дальнейший рост волокон дисперсной фазы идет от поверхности частиц.

Таким образом, частицы антифрикционных добавок содержатся в загустителе полученного смазочного материала, образуя при этом бинарную дисперсную фазу (твердые частицы дисульфида молибдена, диатомита, перлита и УДА связаны физическими и адсорбционными силами с комплексной литиевой солью), отличную от простых мыльных загустителей типа оксистеарата лития (Литол-24). Данный эффект усиливается с уменьшением размеров частиц, при этом образуется разветвленный коротковолокнистый каркас дисперсной фазы со стабилизированными в нем и равномерно распределенными по всему объему смазочного материала твердыми частицами добавки.

В случае взаимодействия пары трения в присутствии комплексной литиевой смазки, модифицированной наноразмерными добавками, во-первых, разветвленная коротковолокнистая структура бинарной дисперсной фазы обеспечивает большую маслоудерживающую способность и, следовательно, большую нагрузочную способность смазочного материала, во-вторых, при разрушении структурного каркаса твердые частицы, входящие в состав волокон дисперсной фазы, высвобождаются и попадают в зону трения в активном состоянии, сохранив сверхмалые размеры, и продолжают работать как противозадирная добавка.

Реализовать подобный механизм функционирования противозадирных добавок возможно только в пластичном смазочном материале, загущенном относительно крупными волокнами дисперсной фазы. Наиболее приемлемым в данном случае загустителем является комплексная литиевая соль, так как ее дисперсная фаза имеет крупноволокнистую структуру, облегчающую внедрение в нее твердых частиц. В процессе приготовления комплексной литиевой смазки используются агрессивные компоненты (гидроокись лития, ортоборная и терефталевая кислоты), которые способствуют диспергированию частиц и активации их поверхности. При синтезе комплексной литиевой смазки реакционная масса подвергается

воздействию высоких температур, что способствует активации поверхности частиц добавок и их внедрению в структурный каркас дисперсной фазы.

Исследование структуры дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок после триботехнических испытаний на пути трения 10 км практически не выявило изменений в структуре ее дисперсной фазы (рис. 5, а), а после испытаний на пути трения 15 км появились признаки изменения структурного каркаса смазки ИТМОЛ-150Н, однако деградация структуры дисперсной фазы прошла не так глубоко, как в случае тонковолокнистой структуры простой литиевой смазки (рис. 5, б–г). Упаковка коротких прямых волокон стала менее плотной, длина волокон несколько уменьшилась. Наблюдаются элементы разрушенных волокон длиной 1...2 мкм и сросшиеся волокна толщиной 0,5...1,0 мкм. Однако в целом коротковолокнистые прямые элементы структуры дисперсной фазы остались без изменения, что говорит об их более высокой нагрузочной способности по сравнению с дисперсной фазой простой литиевой смазки.

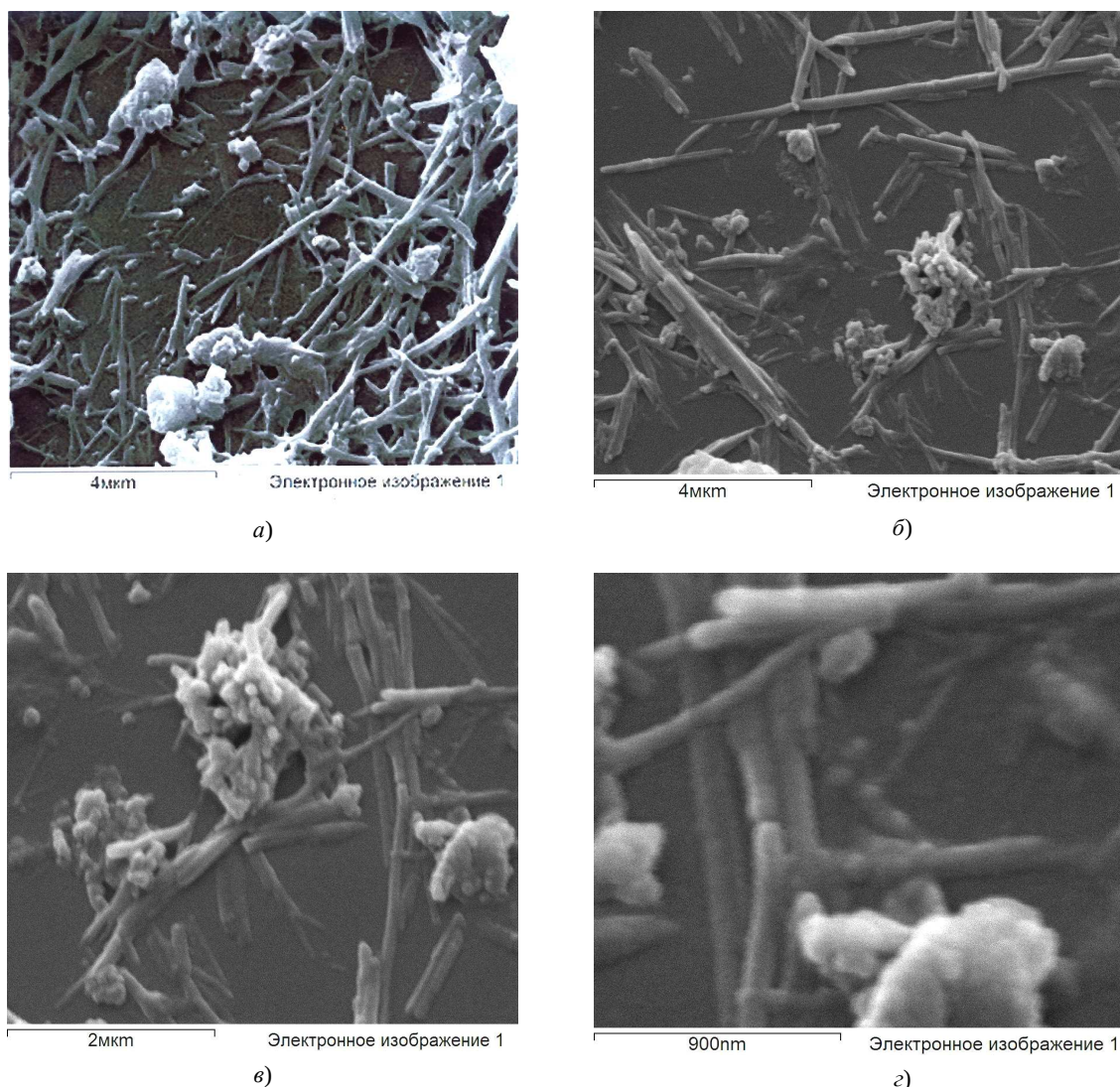


Рис. 5. Микроструктура дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н алмазосодержащим пакетом добавок после 10 км (а) и 15 км (б, в, г) пути трения при различном увеличении

После прохождения 25 км пути трения наблюдается разрушение структурного трехмерного каркаса смазки ИТМОЛ-150Н. Коротковолокнистая структура дисперсной фазы, характерная для исходной смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок, встречается только в отдельных местах (рис. 6, а, б). В основном волокна полностью разрушились и не образуют какой-либо упорядоченной структуры. Однако на этом фоне хорошо видны твердые добавки (рис. 6, в, г), которые практически не разрушились и остались в дисперсной фазе даже после столь длительного деформационно-термического воздействия, что

свидетельствует о высокой способности комплексной литиевой смазки удерживать частицы добавок в зоне трения, не позволяя им агломерировать и выдавливаясь в «мертвые» зоны узла трения.

Состояние слоистых твердых добавок также может служить признаком работоспособности смазочного материала. При этом как излишнее измельчение слоистых твердых добавок до размеров менее 1 мкм, так и их агломерирование до размеров более 25...30 мкм является нежелательным.

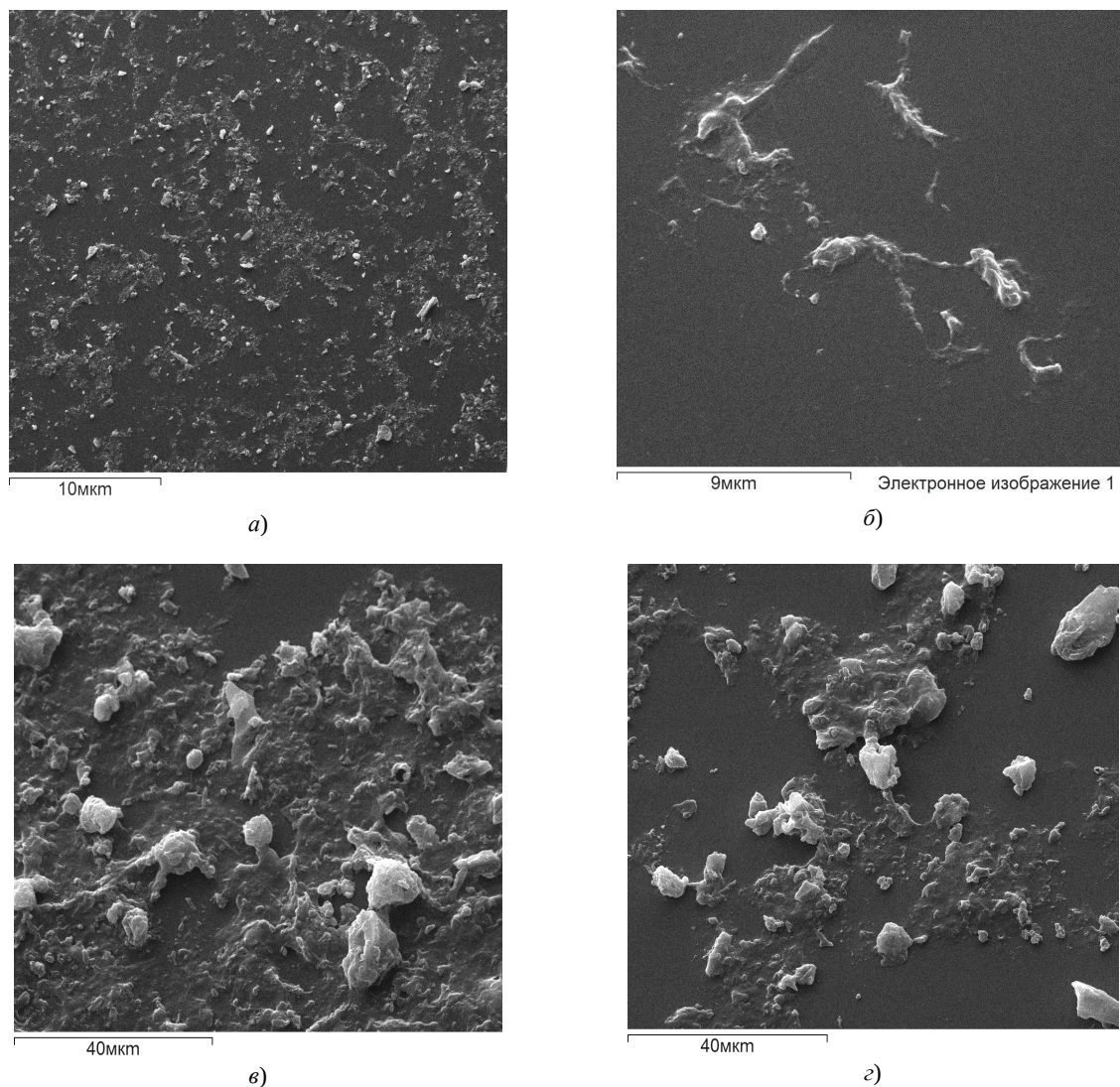


Рис. 6. Микроструктура дисперсной фазы смазки ИТМОЛ-150Н с алмазосодержащим пакетом добавок после 25 км пути трения при различном увеличении

На рисунке 7 приведены зависимости линейного износа для металлопластмассовой ленты DX1 от пути трения при удельной нагрузке 25, 50, и 75 МПа.

Анализ полученных данных свидетельствует:

- использование пластичной смазки с пакетом наноразмерных добавок приводит к интенсификации приработки и ускоренному выходу процесса фрикционного взаимодействия на стадию установившегося трения;
- при увеличении давления испытаний процесс приработки трибосопряжения ускоряется;
- использование пакета добавок снижает интенсивность изнашивания на стадии установившегося трения, что связано с модифицированием поверхностных слоев элементов пары трения алмазно-графитовыми частицами и образованием в бронзовой подложке наноразмерных ячеистых структур [6].

Приведенные данные по величине износа поверхности металлопластмассовой ленты показывают, что использование смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными твердыми частицами различной природы в диапазоне нагрузок 25...50 МПа, снижает интенсивность изнашивания испыты-

ваемого материала, причем эффективность действия этих добавок увеличивается по мере повышения удельной нагрузки в зоне трибоконтакта.

При нагрузке 75 МПа положительный эффект от применения модифицированной смазки проявляется в случае использования ее только на начальной стадии испытаний, по сути – на стадии приработки.

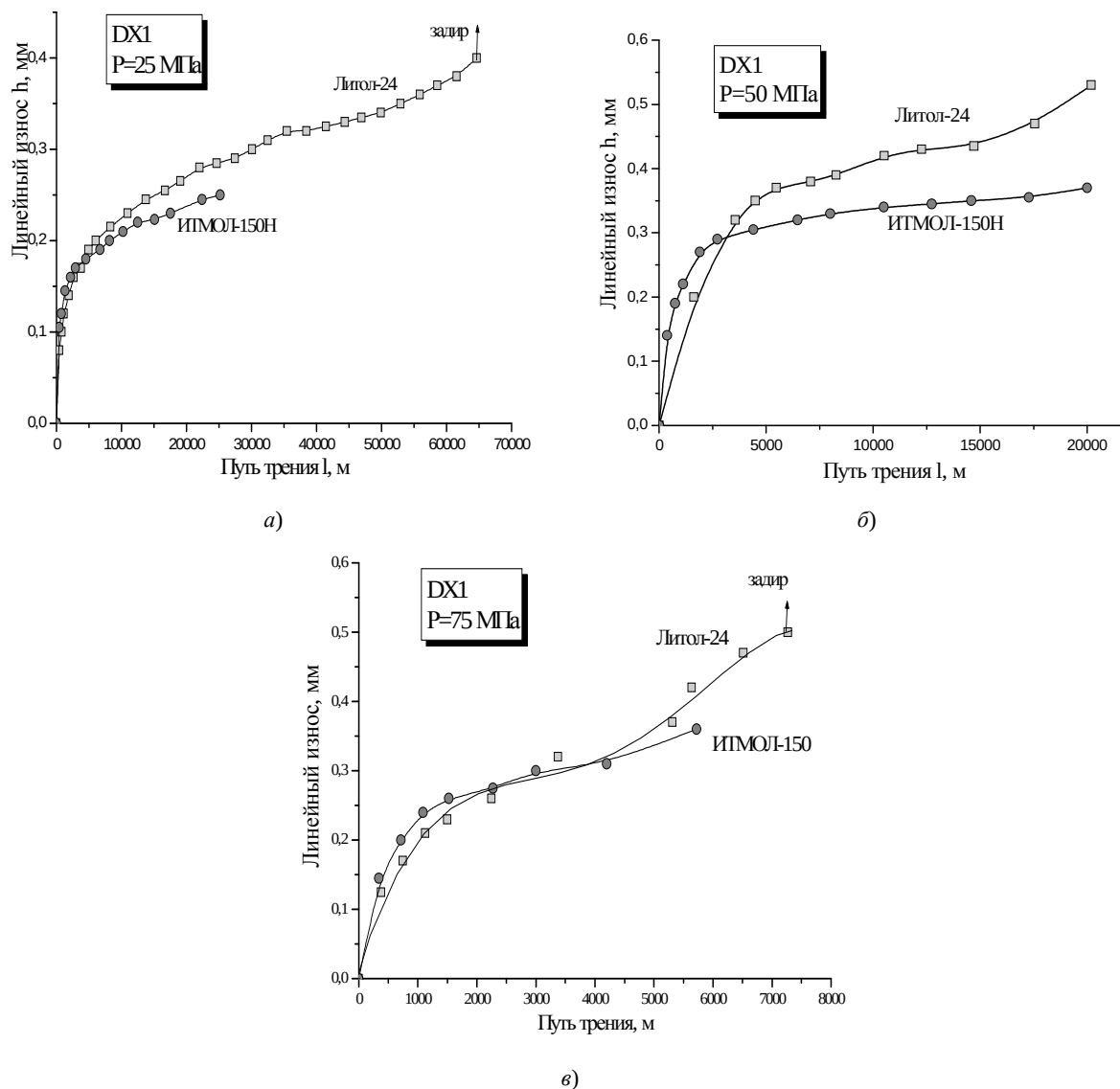


Рис. 7. Зависимость величины линейного износа образцов металлопластмассовой ленты DX1 от пути трения в среде смазок Литол-24 и ИТМОЛ-150Н при различной удельной нагрузке: а – 25 МПа; б – 50 МПа; в – 75 МПа

Повышение износостойкости металлопластмассовой ленты при использовании смазочного материала с ультрадисперсными твердыми добавками можно объяснить совместным действием ряда факторов, способствующих улучшению трибологических свойств самого смазочного материала и изменяющих структуру поверхности трения за счет эффектов дисперсного упрочнения и трибомеханического модифицирования. Включенные в состав бинарной дисперсной фазы смазочного материала наноразмерные частицы повышают коллоидную стабильность смазочного материала, увеличивая маслоудерживающую способность структурного каркаса смазки, придают смазочному материалу противозадирные свойства, что в совокупности приводит к повышению стабильности и нагрузочной способности смазочного слоя. Обеспечение регулярного смазочного режима в зоне трибоконтакта способствует снижению термической нагруженности материалов трущейся пары в зоне трения и повышению структурной устойчивости полимерной составляющей металлопластмассовой ленты. Имеющиеся в составе смазочного материала твердые наноразмерные частицы формируют в металлической поверхности износостойкую ячеистую

структуру за счет процессов интенсивного пластического деформирования и обеспечивают дисперсное упрочнение контактирующих поверхностей за счет их шаржирования в процессе трения.

Прогнозная оценка влияния эволюции структуры дисперсной фазы пластичного смазочного материала на ресурс пар трения на примере шаровой опоры цилиндра подвески карьерного самосвала БелАЗ проведена на основе анализа значений средней интенсивности изнашивания металлопластмассовой ленты DX1, полученных при лабораторных испытаниях.

Для сравнения выбраны результаты триботехнических испытаний при удельных нагрузках 25 и 50 МПа в присутствии пластичных смазок Литол-24 и ИТМОЛ-150Н (таблица).

Прогнозный ресурс вкладыша шаровой опоры карьерного самосвала БелАЗ

Материал образца	Смазочный материал	Удельная нагрузка, МПа	Путь трения, км	Линейный износ, мкм	Средняя интенсивность изнашивания, мкм/км	Допустимая величина износа, мм	Прогнозный ресурс (путь трения), км
Металло-пластмассовая лента DX1	Литол-24	25	64,65	380	5,9	0,4	68
		50	20,2	530	26,2		15
	ИТМОЛ-150Н	25	41,4	120	2,9		138
		50	20,0	370	18,5		22

Сопоставление результатов лабораторных испытаний пары трения «металлопластмассовая лента DX1 – сталь 40ХН» указывает на перспективность применения комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок, поскольку обеспечивает увеличение прогнозного ресурса вкладыша шаровой опоры в 1,5...2,0 раза.

Пластичная комплексная литиевая смазка ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок показывает высокую эффективность в тяжело нагруженных (20...50 МПа) низкоскоростных (до 1,0 м/с) узлах трения при контактировании пары трения «высокопрочный материал – пластичный материал». Эта смазка обладает приработочным эффектом с созданием в контактирующих элементах упрочненных поверхностных слоев повышенной износостойкости. Смазка ИТМОЛ-150Н является совместимой с любой литиевой смазкой, что позволяет взаимозаменять их на стадии эксплуатации.

Анализ карты смазывания карьерных самосвалов БелАЗ и нагрузочно-скоростного режима эксплуатации их узлов трения показывает, что смазка ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок может быть применена при конвейерной сборке ряда узлов карьерного самосвала. Применение смазки ИТМОЛ-150Н с пакетом твердых добавок, обладающей приработочным эффектом, наиболее целесообразно в низкоскоростных тяжело нагруженных узлах трения скольжения, к числу которых относятся:

- центральный шарнир передней подвески;
- шарниры поперечной штанги передней подвески;
- шарниры цилиндров передней подвески;
- упорные подшипники поворотных кулаков;
- шарниры поперечной штанги задней подвески;
- шарниры цилиндров задней подвески; пальцы задних опор подвески;
- центральный шарнир задней подвески.

Применение в указанных узлах модифицированной пластичной смазки позволит повысить качество выпускаемой карьерной техники и снизить затраты на ее эксплуатацию.

Заключение. На основании результатов исследования дисперсной фазы смазок Литол-24 стандартного состава и ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок выявлен механизм эволюции структуры дисперсной фазы пластичного смазочного материала (ПСМ) в процессе трибоконтактирования пары трения в присутствии ПСМ, который включает следующие этапы:

- 1) разрыв связей между волокнами и нарушение трехмерности каркаса;
- 2) разрушение волокон, сопровождающееся их дроблением на более мелкие элементы и хаотичным образованием из них плотных структур со слабопроявляющейся волокнистой структурой;
- 3) разрушение дисперсной фазы до состояния равномерно распределенных, несвязанных друг с другом элементов;
- 4) полная деструкция структуры дисперсной фазы до раствора солей в дисперсионной среде (минеральном масле).

На двух первых этапах пластичная смазка на фоне некоторого ухудшения показателей сохраняет свои эксплуатационные свойства, последующие этапы являются необратимыми и ведут к полной потере работоспособности ПСМ и связанному с этим выходу узла трения из нормального режима эксплуатации.

Разрушение ПСМ, модифицированных пакетом наноразмерных добавок, наблюдается на более поздних стадиях трибоконтакта по сравнению со смазкой без модифицирующих добавок и обусловлено повышенной прочностью и улучшенной маслосдерживающей способностью их бинарной дисперсной фазы. При этом освобождающиеся из структурного каркаса частицы противозадирных добавок продолжают обеспечивать высокую работоспособность смазочного материала на поздних стадиях трибовзаимодействия.

Анализ структуры дисперсной фазы взятой пробы смазочного материала на любом этапе триботехнических испытаний или эксплуатации узла трения позволяет судить о работоспособности пластичной смазки и сделать оценку ее остаточного ресурса.

Применение смазки ИТМОЛ-150Н с пакетом твердых добавок, обладающей приработочным эффектом, наиболее целесообразно в низкоскоростных тяжело нагруженных узлах трения скольжения. Сопоставление результатов лабораторных испытаний пары трения «металлопластмассовая лента DX1 – сталь 40ХН» указывает на перспективность применения комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н с пакетом наноразмерных добавок в шаровой опоре цилиндра подвески карьерного самосвала БелАЗ, поскольку обеспечивает увеличение прогнозного ресурса вкладыша шаровой опоры в 1,5...2,0 раза, а также в ряде других узлов трения карьерного самосвала БелАЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ищук, Ю.Л. Состав структура и свойства пластичных смазок / Ю.Л. Ищук. – Киев: Наук. думка, 1996. – 510 с.
2. Сажевые смазки / И.В. Шульженко [и др.]. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1983. – 44 с.
3. Пластичная комплексная литиевая смазка и способ ее получения: пат. 13722 Респ. Беларусь, МПК7 С 10М 169/00, С 10 М 177/00 / В.И. Жорник, А.В. Ивахник; заявитель ОИМ НАН Беларуси. – № а 20081584; заявл. 10.12.2008; опубл. 30.10.2010 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. – № 3. – С. 106.
4. Триботехнические свойства полимерных композитов в присутствии пластичной смазки с наноразмерными добавками / П.А. Витязь // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VII междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г.: в 3-х т. Т. 2 / под ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 3–11.
5. Препарирование пластичных смазок для исследования их структурного каркаса методом сканирующей электронной микроскопии / В.А. Чекан [и др.]. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005. – № 8. – С. 36–38.
6. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм их разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками / П.А. Витязь [и др.]. Ч. 1. Триботехнические свойства // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 1. – С. 61–68.

Поступила 30.06.2014

THE STRUCTURE EVOLUTION OF DISPERSED PHASE OF GREASES DURING TRIBOLOGICAL CONTACT AND ITS INFLUENCE ON RESOURCE OF FRICTION UNITS

V. ZHORNIK

The article presents the mechanism of evolution of structure of the dispersed phase of grease during tribological contact of friction pair. It is shown that the destruction of greases modified by nanosized additives occurs at later stages of tribological contact as compared to unmodified greases and it is caused by the increased strength and improved oil-retaining capacity of binary dispersed phase of modified greases. At the same time the released from structural skeleton nanosized particles of extreme pressure additives continue to provide the high operability of grease in the later stages of tribological contact. The analysis of the structure of the dispersed phase of the grease at any stage of tribological testing or operation of the friction unit gives an indication of the operability of the grease and assess its residual resource.

УДК 621.793

УПРОЧНЕНИЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ НАНОРАЗМЕРНЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

*д-р физ.-мат. наук, проф. Л.И. ГРЕЧИХИН;
д-р техн. наук, проф. С.А. ИВАЩЕНКО; В.М. КОМАРОВСКАЯ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Разработана физико-математическая модель формирования многослойного упрочняющего покрытия нитридом титана в виде плотноупакованной структуры. Если образуется решеточная кластерная структура нитрида титана, то она должна армироваться молекулами TiN или Ti₃. Многослойное покрытие формируется вакуумно-плазменным (электродуговым) методом в импульсном режиме. Образование молекул нитрида титана происходит вследствие протекания каталитических реакций соединения молекулярного азота с молекулами титана Ti₂ и Ti₃ на поверхности упрочняемой основы.

Введение. Многослойные покрытия широко используются для упрочнения деталей в машиностроении. Наиболее широкое применение нашли покрытия из нитрида титана [1]. Однако следует отметить, что однослойные TiN покрытия не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к деталям. В работе [2] показано, что улучшения физико-механических свойств можно добиться получением наноструктурного покрытия. В работах [3–5] наноструктурные покрытия получали путем формирования многослойного покрытия. В то же время в настоящее время нет научного обоснования, за счет чего происходит улучшение физико-механических свойств данных покрытий, не ясно, какой должна быть толщина одного монослоя, чтобы обеспечивать повышение качественных и эксплуатационных характеристик деталей с многослойным покрытием. Поэтому целью данной работы стала разработка технологического процесса упрочнения деталей из алюминия и его сплавов за счет формирования многослойного TiN покрытия с плотноупакованной структурой. Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать физико-математическую модель процесса формирования TiN покрытия с плотноупакованной структурой с учетом строения основы;
- разработать оптимальную технологию нанесения многослойного TiN покрытия, обеспечивающую максимальное упрочнение без образования кластерных структур.

Кластерная структура алюминия и титана. В расплавленном металле по мере снижения температуры происходит увеличение энергии взаимодействия атомов друг с другом, в результате чего образуются устойчивые двухатомные молекулы, а затем взаимодействие отдельных атомов с двухатомными молекулами приводит к образованию трехатомных молекул. Образующиеся молекулы взаимодействуют между собой и с отдельными атомами. При этом образование трехатомных молекул не может происходить вследствие тройных столкновений атомов. Их образование происходит при бинарном взаимодействии атомов с двухатомными молекулами.

Энергии диссоциации для двухатомных молекул Al₂ и Ti₂ экспериментально измерены и составляют соответственно 2,0 эВ с точностью (3...10) % и 1,2 эВ с точностью > 10 % [6]. Для молекулы Al₂ получено также межъядерное расстояние, которое составляет 2,47 Å [7]. Расчетные значения энергии диссоциации молекулы Al₂ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Энергия диссоциации и ионизации двухатомных и трехатомных молекул алюминия и титана

Параметры	Молекулы				
	TiN	Al ₂	Ti ₂	Al ₃	Ti ₃
r_e , Å	1,818	2,47	3,016	2,139	2,612
$E_{ков}$, эВ	-3,955	-1,577	-1,136	-2,592	-2,538
$E_{ион}$, эВ	-0,827	-0,317	-0,115	-0,562	-0,291
$E_{навед.}$, эВ	-0,210	-0,161	-0,133	-0,0015	-0,017
$E_{e-д.}$, эВ	0,015	0,034	0,114	0,032	0
$E_{д-д.}$, эВ	0,175	0,017	0,065	0,027	-0,042
$E_{рез}$, эВ	4,801	-2,003	-1,204	-3,093	-2,888
$E_{эксп.}$, эВ	4,8	2,0	1,2	-3,226 _{кр.}	—
Θ_i , эВ	11,27	5,95	6,71	5,92	6,65
P_z , Кл·м, 10 ³⁰	0,574	0	0	1,464	5,396
$r_{эфф.д.}$, Å	2,689	2,555	2,755	3,243	3,734
Z	2,102	1,054	1,204	1,331	1,722

Совпадение теоретически рассчитанной энергии диссоциации для молекулы Al_2 с экспериментальным значением реализуется при ковалентном радиусе атома алюминия, равном 1,276 Å. Для ковалентного радиуса, полученного из параметров кристаллической решетки, равного 1,43 Å [7], энергия диссоциации составляет только 1,46 эВ. Энергия ионизации молекулы Al_2 – 5,95 эВ.

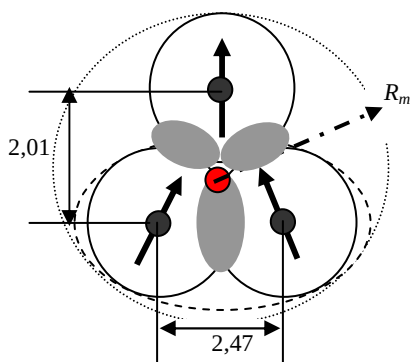


Рис. 1. Расположение атомов в трехатомной молекуле алюминия

Для молекулы Ti_2 межъядерное расстояние рассматривалось как вариационный параметр и находилось по экспериментальному значению энергии связи. Равенство энергий диссоциации произошло на межъядерном расстоянии, составляющем 3,016 Å. Расчетным путем получена также энергия ионизации молекулы Ti_2 , которая составила 6,71 эВ. Экспериментальное значение энергии ионизации в соответствии с [6] равнялось $6,3 \pm (3...10 \%)$. В пределах ошибок измерений теоретически полученное значение энергии ионизации совпадает с экспериментальным значением. Эффективный радиус молекул Al_2 и Ti_2 соответственно равен 2,555 и 2,755 Å. Эти расстояния получены путем сравнения объема шара с эллипсоидальным объемом двухатомной молекулы. При взаимодействии атома алюминия с двухатомной молекулой алюминия наиболее вероятно,

что обе частицы располагаются, как это показано на рисунке 1, с углом связи $\sim 120^\circ$, так как при таком их взаимном расположении реализуется максимальная энергия связи. Из рисунка 1 получаем эффективный радиус трехатомной молекулы:

$$R_m = \frac{1}{\sqrt{3}} r_e + r_a. \quad (1)$$

Для алюминия – это 3,243 Å, а для титана – 3,734 Å. Расстояние между центрами атома и двухатомной молекулой для алюминия равно 2,139 Å, а для титана – 2,612 Å. Расстояния между атомами в кристаллической структуре для алюминия и титана соответственно равны 2,02 и 2,95 Å. На основании полученных расстояний между центрами взаимодействующих частиц произведен расчет энергий разрыва связи между атомом и двухатомной молекулой при образовании трехатомной молекулы (см. табл. 1). Также в таблице 1 приведены результаты теоретического расчета энергий ионизации, эффективных радиусов и эффективных зарядов молекул Al_3 и Ti_3 . Энергия разрыва связи атома с двухатомной молекулой для алюминия и титана значительно отличается от энергии диссоциации двухатомной молекулы и примерно равна энергии бинарной связи между отдельными атомами в кристаллической структуре. Для сравнения в таблице 1 приведено значение бинарной связи атомов алюминия в кристалле гранецентрированной структуры. Незначительное отличие энергий связи обусловлено тем, что в кристалле расстояние между атомами несколько меньше, чем в трехатомной молекуле.

Трехатомная молекула титана обладает сравнительно большим значением дипольного электрического момента. Поэтому кластер титана при низких температурах должен обладать структурой алмаза, а в нормальных условиях – гексагональной плотноупакованной структурой.

Чтобы понять сложный механизм формирования и взаимодействия разных частиц с поверхностью упрочняемого материала, важно выяснить, как взаимодействуют атомы, двухатомные молекулы и трехатомные молекулы между собой и друг с другом в процессе формирования конденсированного состояния.

Взаимодействие атома с трехатомной молекулой. На рисунке 2 показано примерное расположение отдельных атомов относительно трехатомной молекулы.

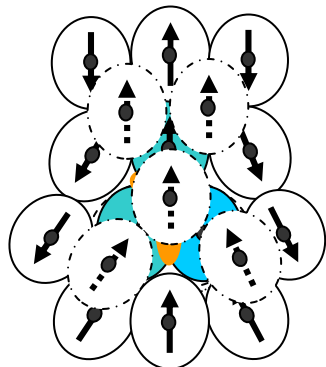


Рис. 2. Кластерная структура при взаимодействии трехатомной молекулы с отдельными атомами

В такой структуре вокруг трехатомной молекулы алюминия и титана в ближайшем окружении находится 20 и 8 атомов с расстоянием между центрами взаимодействующих частиц 3,599 и 3,687 Å соответственно. Для алюминия и титана среднее значение бинарной связи атомов с трехатомной молекулой составляет $\sim 0,255$ и $0,191$ эВ. При этом ковалентная связь в основном определяет результирующую энергию связи (85...90 %).

Взаимодействие двухатомной молекулы с трехатомной молекулой. Взаимодействие трехатомной молекулы с двухатомными молекулами образует разветвленную структуру, изображенную на рисунке 3.

Средняя энергия бинарного взаимодействия для алюминия определяется в основном ковалентной связью и составляет в среднем $\sim 0,040$ эВ.

Для титана средняя энергия бинарной связи составляет $\sim 0,050$ эВ, и определяется в основном диполь-дипольным взаимодействием. Такая связь в титане может устойчиво реализоваться вплоть до температуры 580 К.



Рис. 3. Схематичное изображение формирования кластерной структуры при взаимодействии двухатомных молекул с трехатомной молекулой

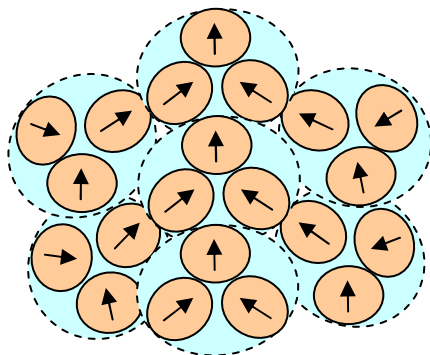


Рис. 4. Расположение трехатомных молекул в слое в процессе их взаимодействия

Взаимодействие трехатомных молекул алюминия друг с другом формируют кластер гранецентрированной структуры, как это показано на рисунке 4. Средняя энергия бинарного взаимодействия внутри кластера с учетом несимметричного распределения электронной плотности внутри трехатомной молекулы алюминия составляет $0,0872$ эВ, что соответствует температуре 1012 К, а взаимодействие между кластерами алюминия создает кластерную решеточную структуру, которая распадается при температуре плавления алюминия 934 К.

Для титана ситуация более сложная. Кластерные образования формируются не только вследствие бинарного взаимодействия между отдельными атомами, но и путем образования структур вокруг трехатомных молекул. В результате получают сложные аллотропические изменения титана в зависимости от роста или уменьшения температуры кристалла. В нормальных условиях титан обладает гексагональной плотноупакованной структурой. Общий вид кластеров алюминия и титана приведен на рисунке 5.

Молекула нитрида титана. Взаимодействие между атомами титана и азота образуют двухатомную молекулу нитрида титана. Основные исходные данные атомов азота и титана приведены в [6; 7]. На основе этих данных произведен расчет всех основных характеристик молекулы нитрида титана и получены следующие результаты: при энергии диссоциации, равной $4,8$ эВ значение межъядерного расстояния составило $1,818$ Å, что несколько меньше суммы ковалентных радиусов

титана и азота – $2,16$ Å; потенциал ионизации – $11,27$ В; дипольный электрический момент молекулы нитрида титана – $0,574 \cdot 10^{-30}$ Кл·м; эффективный радиус молекулы $R_{эф} = 2,689$ Å; радиус иона – $2,031$ Å, а потенциал второй кратности ионизации $22,0$ В.

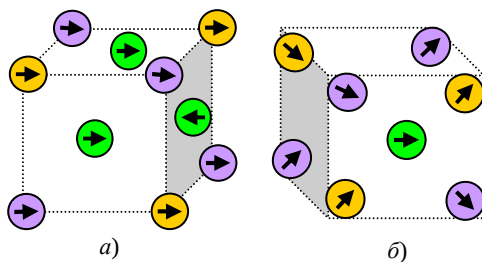


Рис. 5. Общий вид кластера:
а – алюминия; б – титана

Образование плотноупакованного слоя из молекул нитрида титана. Когда на поверхности металла образуются молекулы нитрида титана, они взаимодействуют с кластерами этого металла. Вначале поверхность металла покрывается мономолекулярным слоем, а затем образуется следующий мономолекулярный слой, который с предыдущим слоем связан адгезионными силами и образуется плотноупакованная структура, изображенная на рисунке 6. Каждая молекула в ячейке адгезии взаимодействует с 12-ю молекулами. Бинарная связь между молекулами нитрида титана обусловлена ковалентной и ионной связью, а также диполь-дипольным взаимодействием. В плотноупакованной структуре нитрида титана ковалентная и ионная связь составляет $0,022$ эВ, а диполь-дипольная – $0,078$ эВ. Результирующая энергия связи на одну молекулу составляет $0,100$ эВ. Энергия бинарной связи между молекулами нитрида титана в плотноупакованном слое незначительно превосходит энергию бинарной связи между кластерами алюминия ($0,08$ эВ). Следовательно, при температуре плавления основы упрочняющая пленка нитрида титана не должна заметно разрушаться. Нитрид титана на поверхности упрочняемого материала взаимодействует с кластерными образованиями алюминия. Расстояние между молекулой и кластером доста-

точно большое, поэтому ковалентной и ионной связью можно пренебречь. В этом случае связь с основой определяется электрон-дипольным и диполь-дипольным взаимодействиями.

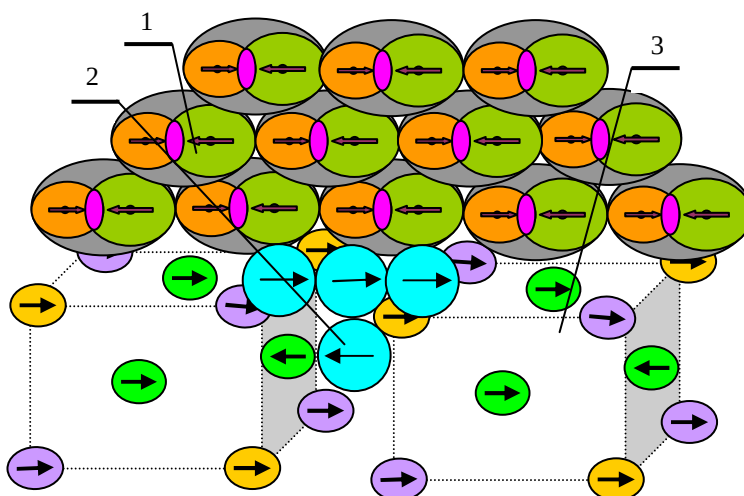


Рис. 6. Структура упрочненного покрытия на поверхности алюминия:
1 – плотноупакованный слой нитрида титана; 2 – плотноупакованный слой поверхности алюминия трехатомными молекулами титана; 3 – кластерная структура алюминия

С учетом принципа суперпозиции электрических полей энергия связи молекул нитрида титана с кластерами алюминия равна 0,098 эВ. Это достаточно прочная связь.

По мере роста толщины пленки могут формироваться кластеры из молекул нитрида титана.

Образование кластерных упрочняющих покрытий. Кластеры нитрида титана являются молекулярными кластерами. Общий вид такого кластера изображен на рисунке 7. В упрочняющем покрытии нанокластеры нитрида титана создают кристаллическую решетку, связь между частицами в которой определяется преимущественно электрон-дипольным и диполь-дипольным взаимодействиями.

Результирующий дипольный электрический момент кластера нитрида титана $4,018 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Кластерная решеточная структура нитрида титана обладает простой кубической структурой. Общий вид кластерной решеточной структуры нитрида титана схематически показан на рисунке 8. В этом предположении энергия бинарной связи в кластерной решеточной структуре в вертикальном направлении составляет 0,086 эВ, а в горизонтальном направлении – 0,034 эВ.

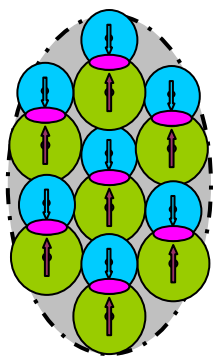


Рис. 7. Изображение кластера из нитрида титана

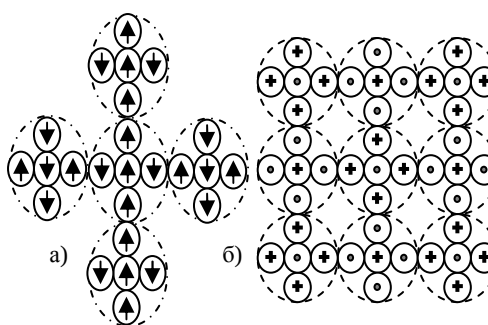
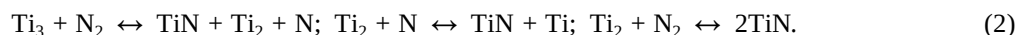


Рис. 8. Кластерная решеточная структура нитрида титана:
а – вид сбоку; б – вид сверху

Из рисунка 8, б видно, что в кластерной решеточной структуре нитрида титана образуются столбообразные пустоты достаточно большого размера, т.е., кристалл нитрида титана в чистом виде является рыхлой структурой. Получается, что как только в плотноупакованной структуре начинают формироваться кластеры, такая пленка начинает отслаиваться от основы при температуре 400 К и выше. Чтобы этого не происходило, следует столбообразные пустоты чем-то заполнять. Такое заполнение может осуществляться трехатомными молекулами титана и молекулами нитрида титана.

Технология многослойного вакуумно-плазменного упрочнения деталей из алюминия и его сплавов реализуется в следующей последовательности. Вначале производится подготовка поверхности основы (внекамерная и внутрикамерная). Внутрикамерная подготовка основы заключается в бомбардировке ионами материала катода. При этом происходит интенсивный разогрев основы, что необходимо для повышения константы химической реакции при образовании молекул нитрида титана. Затем наносится подслоя ионов титана и после этого производится напуск азота. Азот с титаном вступает в химическую реакцию по схеме:



В результате образуются молекулы нитрида титана. Из молекул нитрида титана формируются кластеры, которые создают кластерную решеточную структуру, которая в ряде случаев не выполняла своей роли как упрочняющего покрытия. Это предположение проверено экспериментально путем измерения деформационного изгиба тонких пластин алюминия в зависимости от времени напыления (рис. 9).

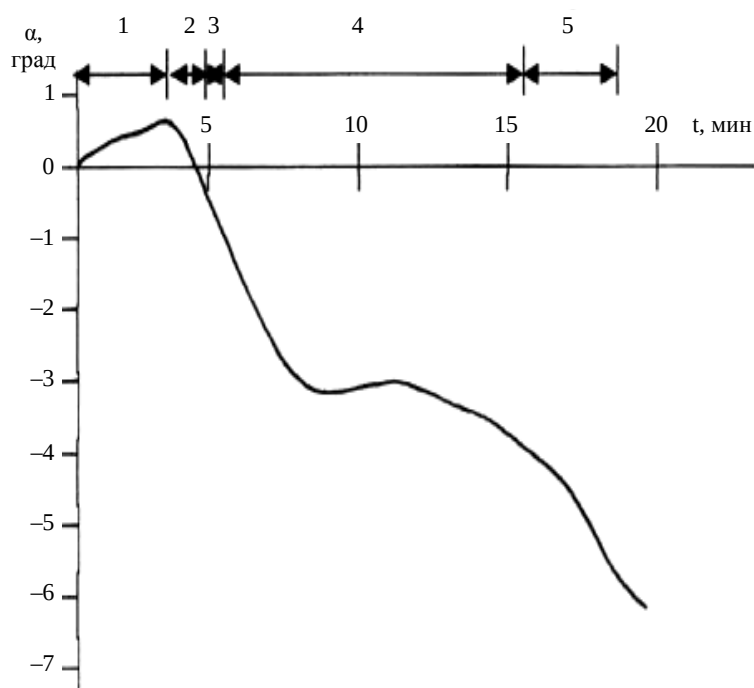


Рис. 9. Зависимость изменения деформации образца от времени формирования покрытия:

- 1 – очистка; 2 – нанесение подслоя титана; 3 – формирование нитрида титана в процессе напуска азота в камеру;
- 4 – образование кластерной решеточной структуры и заполнение столбообразных пустот молекулами нитрида титана;
- 5 – остывание образца при конвективном теплообмене

По мере формирования плотноупакованной структуры возникает резкое возрастание деформации. После 8-ми минут напыления в покрытии начинают формироваться кластерные структуры нитрида титана, продолжается такое превращение примерно три минуты, а по мере заполнения столбообразных пустот трехатомными молекулами титана или молекулами нитрида титана вновь образуется плотноупакованная структура.

Таким образом, многослойное упрочняющее покрытие из нитрида титана представляет собой плотноупакованное состояние. Когда в больших толщинах покрытия начинают образовываться кластерные структуры, возникает покрытие, сформированное решеточной структурой молекулярными кластерами нитрида титана. Тогда необходимо кластерную решеточную структуру нитрида титана армировать молекулами TiN или Ti_3 и таким образом увеличивать плотноупакованную структуру по толщине.

Закключение. В результате проведенных исследований показано, в какой последовательности образуется многослойное плотноупакованное упрочняющее покрытие. Для такого покрытия разработана физико-математическая модель формирования многослойного упрочняющего покрытия нитридом титана в виде плотноупакованной структуры. Для упрочнения образующейся решеточной кластерной структуры нитрида титана необходимо ее армировать молекулами TiN или Ti_3 . Многослойное покрытие получают путем импульсного напыления. Образование молекул нитрида титана происходит вследствие протекания

каталитических реакций соединения молекулярного азота с молекулами титана Ti_2 и Ti_3 . Наиболее прочное покрытие реализуется, когда процесс напыления длится не более 8 минут.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иващенко, С.А. Газотермические и вакуумно-плазменные покрытия со специальными физико-механическими свойствами / С.А. Иващенко, И.С. Фролов, Ж.А. Мрочек – Минск: УП «Техно-принт», 2001. – 236 с.
2. Панин, В.Е. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий / В.Е. Панин, В.П. Сергеев, А.В. Панин – Томск: Изд. Томск. политехн. ун-та, 2009. – 285 с.
3. Гречихин, Л.И. Энергия взаимодействия частиц при формировании вакуумно-плазменных покрытий / Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Серия фізіка-тэхнічных навук. – 2002. – № 4. – С. 11–17.
4. Витязь, П.А. Нанотехнология получения металлокерамики на основе титана / П.А. Витязь, Л.И. Гречихин // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 5. – С. 81–87.
5. Гречихин, Л.И. Упрочнение металлов многослойными металлическими и интерметаллическими соединениями / Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко // Фундаментальные проблемы естествознания и техники: материалы междунар. конгр. – СПб., 2000. – Т. 1, № 1. – С. 79–85.
6. Радциг, А.А. Справочник по атомной и молекулярной физике / А.А. Радциг, Б.М. Смирнов. – М.: Атомиздат, 1980. – 240 с.
7. Физические величины: справ. / А.П. Бабичев [и др.]; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. Гречихин, Л.И. Упругие напряжения в тонкопленочных покрытиях при ионно-плазменном упрочнении алюминиевых сплавов металлическими и интерметаллическими соединениями на основе титана / Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко, Е.В. Макаревич // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 4. – С. 57–62.
9. Гречихин, Л.И. Наночастицы и нанотехнологии / Л.И. Гречихин. – Минск: ИООО «Право и экономика», 2008. – 406 с.
10. Гречихин, Л.И. Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика / Л.И. Гречихин. – Минск: ИООО «Право и экономика», 2008. – 302 с.
11. Сканава, Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей) / Г.И. Сканава. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. – 500 с.
12. Фейман, Р. Феймановские лекции по физике / Р. Фейман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Вып. 5. Электричество и магнетизм. – М.: Мир, 1966. – 296 с.
13. Тамм, И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. – М.: Физматгиз, 2003. – 516 с.
14. Андриевский, Р.А. Роль размерных эффектов и поверхностей раздела в наноматериалах / Р.А. Андриевский // Наноструктурные материалы-2008 Беларусь – Россия – Украина: материалы первой междунар. науч. конф., Минск, 22–25 апр. 2008 г. – Минск, 2008.
15. Гречихин, Л.И. Компьютерное моделирование физических свойств металлов и упрочняющих покрытий / Л.И. Гречихин, С.А. Иващенко, И.П. Шумский // Современные проблемы прочности: науч. тр. V Междунар. семинара. – Великий Новгород: НГУ им. В.А. Лихачева, 2001. – Т. 2. – С. 303–316.

Поступила 09.06.2014

HARDENING OF ALUMINUM AND ITS ALLOYS OF NANOSCALE MULTILAYER COATINGS

L. GRETCHIKHIN, S. IVASCHENKO, V. KOMAROVSKAYA

The physical and mathematical model of multi-layer titanium nitride coated reinforcement in the form of close-packed structure is designed. If the lattice is formed cluster structure of titanium nitride, it must be reinforced molecules TiN or Ti_3 . Multi-layer coating is formed by vacuum-plasma (arc) method in the pulsed mode. Formation of molecules occurs due to titanium nitride catalytic reactions with molecular nitrogen compound molecules Ti_2 and Ti_3 titanium surface hardenable substrate.

УДК 621.78.001; 621.81

УПРОЧНЯЮЩИЙ ЭФФЕКТ ТЕРМОГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Представлены результаты разработки методологических принципов создания термогидрохимической обработки (ТГХО). Процесс ТГХО включает химическую обработку поверхности в специальной вододисперсной среде и собственно термообработку. Исследованы напряженное состояние и свойства инструментальных материалов, подвергнутых ТГХО. Разработанная технология повышает стойкость стальных, твердосплавных и алмазных инструментов в 1,3...8 раз по сравнению с необработанными.

Введение. Проблема повышения долговечности инструментов, приспособлений и деталей машин, по-прежнему, остается актуальной. Решить ее можно путем применения различных способов упрочнения. Наибольший научный и практический интерес в этом плане представляет низкотемпературный процесс термогидрохимической обработки (ТГХО), поскольку он отличается высокой эффективностью и производительностью, применим для готовых к эксплуатации изделий из различных материалов [1–5].

Несмотря на достигнутые успехи в области упрочнения, инструменты являются наиболее слабым звеном всего технологического процесса изготовления деталей машин и изделий. В этой связи разработка научной методологии создания новых технологий упрочнения инструментальных материалов является важной составляющей высокоэффективного развития отечественной техники и промышленности.

В данной работе рассмотрены принципы разработки технологии термогидрохимической обработки инструментальных материалов, механизмы и характер их упрочнения, примеры реализации процесса ТГХО.

Анализ механизмов упрочнения инструментальных материалов. Современные представления об упрочнении материалов строятся на основе двух основных подходов: энергетического [6] и структурно-химического [7–11]. В настоящей работе впервые предложена классификация структурно-энергетических механизмов упрочнения инструментальных материалов (рис. 1).

Согласно теории Дж. Мартина, Р. Дозрти, С.Т. Конобеевского и других о стабильности микроструктур металлических систем, максимально улучшенными свойствами обладают материалы с метастабильными микроструктурами [6; 8]. Сплав может иметь единственную стабильную и бесконечное множество нестабильных микроструктур. Поскольку сплав термодинамически нестабилен, структура может меняться со временем и с изменением температуры; в этом случае теряются все ее преимущества. При нагреве их термическая устойчивость определяется температурой начала превращений в менее желательные структуры. Нестабильность структуры может быть вызвана изменением химической свободной энергии, влиянием энергии деформации и поверхностей раздела, влиянием энергии электромагнитных источников и др. [6].

Отмечены два пути формирования метастабильных микроструктур:

- 1) создание избыточной свободной энергии материала и окружающей среды;
- 2) создание избыточной свободной энергии внешней и внутренней поверхности раздела инструментального материала.

Движущей силой изменения микроструктуры является уменьшение свободной энергии атомов ΔF , но для перехода в стабильное состояние им требуется преодолеть энергетический барьер и затратить избыточную свободную энергию активации ΔF_A . Чем больше прирост этой энергии, тем более нестабильны атомы; они находятся в активированном состоянии. Свободная энергия системы и поверхности зависит от различных факторов: температуры, давления, химической концентрации и др. [6]. Поэтому чтобы получить избыточную свободную энергию ΔF_A , создают наибольший градиент температур, напряжений, химических концентраций, других параметров в материале и внешней среде. Причем эти процессы должны быть скоротечны.

На основании представленного выше анализа нами предложена гипотеза о том, что прирост свободной энергии можно достичь при быстрой циклической смене параметров процесса (температуры, напряжений, давления, химических концентраций, др.) даже с невысоким их градиентом. Например, высокометастабильные структуры материалов можно сформировать при термоциклической парожидкой трансформации (ПЖТ) или кипении вододисперсной среды. Повышения свободной энергии поверхности раздела можно достичь и за счет поверхностного насыщения материала различными дефектами решетки (вакансиями, дислокациями и т.п.), атомами легирующих элементов, а также созданием многофазной и сильно измельченной (нано-) структуры (см. рис. 1).

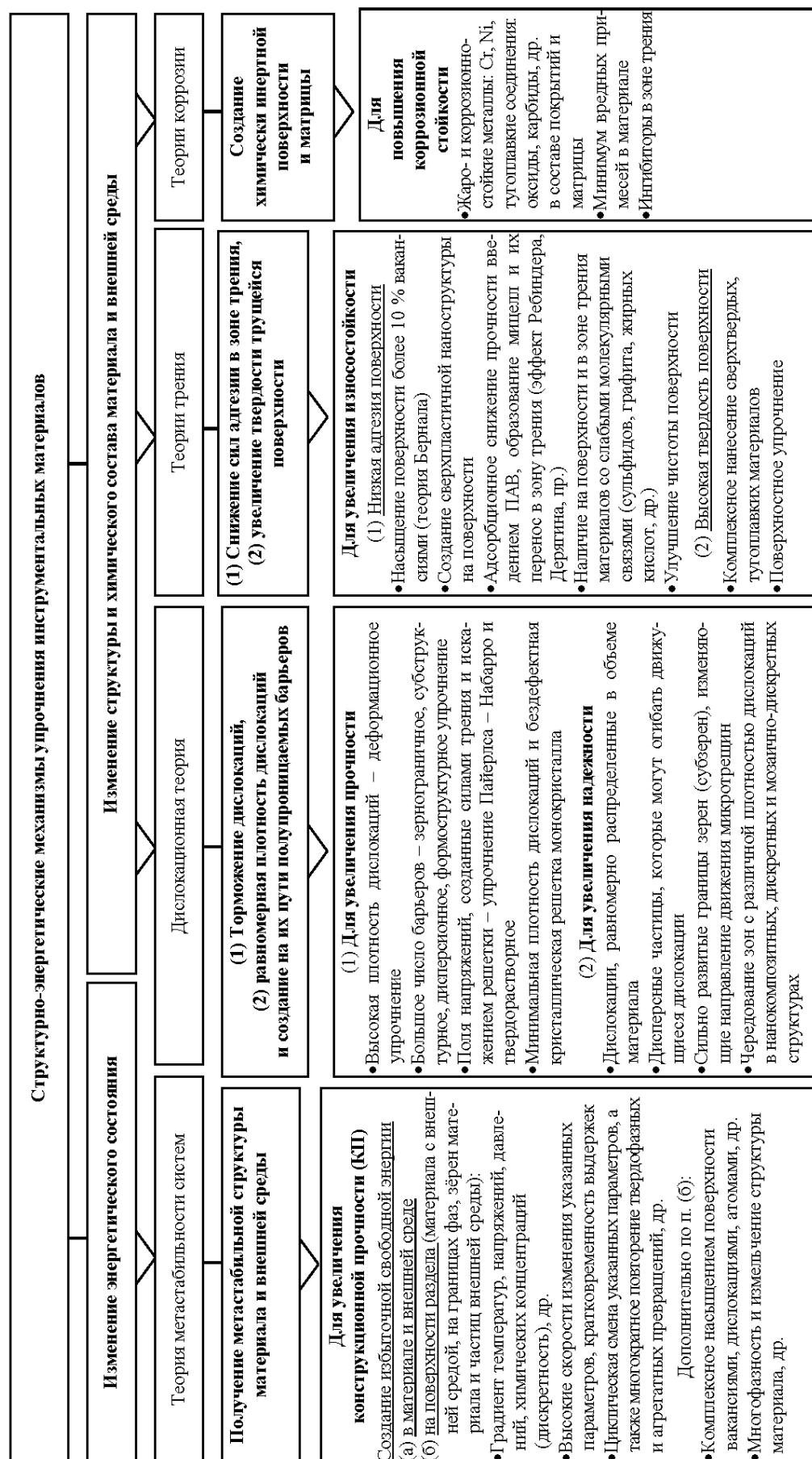


Рис. 1. Классификация структурно-энергетических механизмов упрочнения инструментальных материалов

В основе структурного упрочнения металлических и керамических материалов с кристаллической структурой лежит дислокационная теория, согласно которой упрочнение есть результат взаимодействия дислокаций с препятствиями различного порядка: дислокациями, элементами субструктуры, границами зерен, растворенными атомами, дисперсными частицами [9; 11]. Повышение прочностных характеристик создается торможением дислокаций комбинацией указанных препятствий, а увеличение надежности (вязкости разрушения, пластичности) – за счет огибания регулярно расположенных дисперсных частиц движущимися дислокациями при равномерном распределении их в объеме и за счет затруднения развития хрупкой микротрещины в сильно измельченных зернах и субзернах, границы которых изменяют направление движения трещины.

Повышение прочности металлических материалов достигается за счет трения кристаллической решетки силами Пайерлса – Набарро (σ_0) [11] или уровнем структурных напряжений решетки ($\Delta\sigma_H$), а также суммарным вкладом твердорастворного ($\Delta\sigma_{Т.Р.}$), дислокационного (деформационного) ($\Delta\sigma_D$), зернограницного ($\Delta\sigma_3$), субструктурного ($\Delta\sigma_C$) и дисперсионного ($\Delta\sigma_{дисп.}$) упрочнения. В работах [11] отмечено различное влияние на упрочнение железоуглеродистого сплава его структуры (перлита, феррита и мартенсита), тем не менее расчет зернограницного и субструктурного упрочнения ведется по размеру зерна или субзерна (табл. 1) на основании формулы Холла – Петча. Поскольку существуют различные формы структурных составляющих (например, у мартенсита – реечный и пакетный; у перлита – пластинчатый и зернистый), что определенно влияет на прочность сплава, в настоящей работе предложено учитывать это упрочнение как «формоструктурное» ($\Delta\sigma_{форм.}$), которое еще обозначается как «структурные особенности матричной фазы». Этот механизм упрочнения можно оценивать размером пластин (d) мартенсита и перлита наряду с долей их распределения в матрице (f).

Таблица 1

Известные структурные механизмы упрочнения стали (0,25 % С) по теории дислокаций [19; 20]

Механизм упрочнения	Структура	Компоненты механизма упрочнения
За счет напряжений решетки $\Delta\sigma_H$	Феррит + перлит Мартенсит	Изменение параметров кристаллической решетки матрицы на основе феррит + перлит, мартенсит, пр.
Твердорастворный $\Delta\sigma_{Т.Р.}$	Мартенсит	Легирование феррита
	Мартенсит	Легирование мартенсита
Дислокационный $\Delta\sigma_D$	Феррит + перлит	Дислокации в феррите ($\rho = 10^7 \dots 10^8$)
	Мартенсит	Дислокации в мартенсите ($\rho = 10^{10} \dots 10^{12}$)
Зернограницный $\Delta\sigma_3$	Феррит + перлит	Размер зерен
	Мартенсит	Размер мартенситных пакетов, двойников
Субструктурный $\Delta\sigma_C$	Феррит + перлит	Размер субзерен
	Мартенсит	Размер субзерен в мартенситном пакете
Дисперсионный $\Delta\sigma_{дисп.}$	Феррит + перлит	Перлитная составляющая
	Мартенсит	Дисперсные карбиды в феррите и отпущенном мартенсите

Согласно Оровану [9], физический смысл упрочнения состоит в том, что прирост предела текучести $\Delta\sigma_T$ в сравнении с идеальным бездефектным материалом – это сумма вкладов действующих механизмов упрочнения:

$$\Delta\sigma_T = \Sigma\Delta\sigma_i = \Delta\sigma_H + \Delta\sigma_{Т.Р.} + \Delta\sigma_D + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_C + \Delta\sigma_{дисп.} + \Delta\sigma_{форм.}$$

С другой стороны, максимальной прочностью обладают бездефектные монокристаллы и наноматериалы, имеющие минимальное количество дислокаций в кристаллической решетке [11]. Увеличение надежности можно создавать путем чередования структурных зон с различной плотностью дислокаций, например, в нанокомпозитах, когда в бездислокационных нанозернах отсутствуют очаги образования микротрещин, а развитие трещин затрудняется при формировании несплошных покрытий и материалов с дискретной, мозаично-дискретной и наноструктурой [11–14]. Все вышесказанное не противоречит теории дислокаций.

Помимо дислокационного механизма существуют другие структурные механизмы упрочнения инструментальных материалов, связанные с поверхностными процессами трения и коррозии. Согласно современным теориям трения и износа (молекулярно-механической, адгезионно-деформационной, молекулярно-атомистической, дислокационно-вакансионной и др.) сопротивляемость изнашиванию можно повысить двумя путями: 1) снижением прочности адгезионной связи в узле трения; 2) увеличением твердости трущейся поверхности [7; 8]. Первый путь достигается (см. рис. 1) насыщением поверхности вакансиями (более 10 %), когда по теории Бернала любое твердое тело приобретает свойства жидкости;

нанесением твердосмазочных покрытий из наноразмерных и слоистых материалов; введением в зону трения этих твердосмазочных компонентов, а также поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые снижают адсорбционную прочность твердого тела (эффект Ребиндера), и др. Второй путь достигается при формировании оксидной пленки определенного состава и структуры (эффект Роско) и другими известными способами повышения твердости поверхности инструмента.

При трении следует учитывать температурный фактор, когда при определенной температуре: 1) скачкообразно возрастает скорость коррозии и идет диффузионное перераспределение элементов в матрице, приводящее к износу инструмента; 2) происходит деструкция смазочного материала, в результате чего теряются его антифрикционные свойства [7; 8]. В этом случае инструментальные сплавы следует защищать и легировать коррозионно-стойкими металлами и соединениями, а также использовать другие меры защиты (см. рис. 1).

Научные принципы и подходы, положенные в основу создания термогидрохимической обработки

1. Согласно теории Дж. Мартина, Р. Доэрти, С.Т. Конобеевского максимально улучшенными свойствами обладают стали и сплавы с метастабильными микроструктурами, которые получают при значительном градиенте температур и напряжений, химическом градиенте, при большой развитости поверхностей раздела, при интенсивной пластической деформации и других воздействиях [6]. Классическим низкотемпературным способом получения метастабильных структур является процесс безэлектролизного осаждения из сильно пересыщенных водных растворов [6; 15]. Главным преимуществом перед другими процессами формирования метастабильных структур является то, что данный способ химического осаждения позволяет проводить при температурах ниже начала структурных (разупрочняющих) превращений и сохранять размеры изделий в допустимых пределах; применяют для готовых изделий после финишной обработки. При этом способе отпадает необходимость последующей высокотемпературной термообработки, когда при нагреве выше $0,3...0,6 T_{пл.}$ разрушаются многие из наиболее метастабильных структур [6; 15]. В условиях сверхвысокой химической нестабильности, присущей процессу бестокового осаждения и другим известным способам, таким как «varosol» (осаждение из паровой фазы на сильно охлажденную подложку), «liquisol» (закалка разбрызгиванием капель расплава на холодную подложку с высокой теплопроводностью), возможно формирование аморфной или нанокристаллической структуры. Безэлектролизное осаждение металла Me представляет собой синтез или химическое восстановление ионов Me^{+n} в присутствии катализатора по реакции [15]: $Me^{+n} + ne^-$ (восстановитель) $\rightarrow Me^0$.

Роль катализатора первоначально выполняет металлическая подложка из Fe, Ni, Co, Al, др., поверхность которой имеет избыточную свободную энергию, а в дальнейшем – образовавшееся покрытие. Каталитическое действие подложки обусловлено правилом электроположительности: металл покрытия должен быть электроположительнее металла, на который осаждается. Поэтому число этих покрытий ограничено: можно осадить некоторые металлы (Ni, Co, Cu, Sn, Ag, др.), сплавы (Ni-Co, Ni-Sn, др.), их твердые растворы (Ni-P, Co-P, Ni-B, Co-W-P) и соединения (PbS, CuS, SnS, PbSe, др.) [15]. При введении в состав металлического покрытия дисперсной фазы из сверхтвердых и антифрикционных материалов формируются комплексные химические покрытия (КХП); из-за малой растворимости и плохой адгезии этих компонентов в металлическом осадке их эффективность невысокая. При нанесении покрытий на неметаллические материалы, которые не являются катализаторами, требуется специальная обработка и активация поверхности. Поскольку безэлектролизное химическое покрытие формируется в результате поступления атомов при температурах ниже температуры кипения, неравновесное состояние осаждаемого материала обусловлено в основном градиентом химической концентрации сильно пересыщенных водных растворов [6].

При разработке технологии ТГХО в наибольшей мере реализуются термохимические источники воздействия на структуру инструментальных материалов, чтобы сформировать высокометастабильные структуры. Для предлагаемого процесса ТГХО свойственна сверхвысокая химическая нестабильность, созданная несколькими механизмами упрочнения (см. рис. 1):

- значительным градиентом химической концентрации дисперсной фазы в насыщающей среде;
- сильно развитой поверхностью элементов наноструктуры твердого осадка, образуемого как в насыщающей среде, так и на поверхности инструментальных материалов;
- парожидкой трансформацией, когда циклически повторяются превращения «жидкость $\leftrightarrow$ пар» водной среды при температуре ее кипения.

2. Термогидрохимическая обработка предназначена химически осаждать на поверхности различных материалов антифрикционные твердосмазочные покрытия, которые обладают резервными возможностями в жестких и катастрофических условиях эксплуатации инструментов и машин [7; 16]. Покрытия приобретают твердосмазочные свойства в случае, когда:

- созданы из материалов со слоистой поликристаллической структурой и со слабыми молекулярными связями: на базе графита, сульфидов, фосфидов, жирных кислот и др.;
- сформированы на основе наноструктурированных тугоплавких и сверхтвердых материалов;

- реализуется теория Бернала, согласно которой любое твердое тело приобретает свойства жидкости, если в кристаллической решетке содержится более 10 % вакансий;
- реализуется эффект Ребиндера при участии ПАВ, который ведет к пластифицированию поверхностного слоя и созданию положительного градиента механических свойств в зоне трения;
- реализуется эффект Киркиндала, который приводит к селективному растворению из сплава легирующих элементов вследствие различия их электрохимических потенциалов, в результате чего формируется квазжидкая пленка, снижающая коэффициент трения и фрикционный разогрев [8].

Термогидрохимическая обработка – наиболее простой и универсальный метод получения твердосмазочных покрытий. С помощью этого метода можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, алмаза, других антифрикционных материалов и их композиций [1–5]. Наноструктурированные покрытия обладают сверхпластичностью, они облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в то же время твердость наноматериалов из металлов и тугоплавких соединений возрастает 2...3 раза [3; 4]. Триботехнические свойства наноструктурированных покрытий сильно зависят от толщины слоя; оптимальной считается толщина от нескольких десятков до сотен нанометров [8; 16]. Данные покрытия можно наносить на готовые к эксплуатации инструменты, поскольку в результате ТГХО сохраняется исходная структура инструментального материала (механически не разупрочняется); при этом конечные размеры и форма инструментов практически не меняются. С другой стороны, в условиях интенсивной эксплуатации инструмента, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения трения рабочей кромки инструмента является твердосмазочное покрытие, гарантирующее длительную работу инструмента.

3. Хотя сульфиды и оксиды обладают наилучшими антифрикционными свойствами в атмосферных условиях, предпочтение отдается оксидам, поскольку они являются постоянной составляющей граничного слоя, образующегося при трении любого твердого тела [7]. Однако оксиды трения хрупкие [8], поэтому так важно иметь на поверхности сверхпластичные нанокристаллические оксиды. При формировании оксидной пленки определенного состава и структуры можно получить поверхностное упрочнение (эффект Роско) и снижение сопротивления сдвигу при трении в присутствии ПАВ (эффект Ребиндера) [7; 17]. Использование оксидов в процессе ТГХО отвечает требованиям его биосовместимости и экологической безопасности.

4. Для создания более высокого химического градиента целесообразно проводить процесс ТГХО в вододисперсной насыщающей среде. Обязательным условием образования дисперсной системы являются:

- взаимная нерастворимость дисперсной фазы и среды (воды);
- высокая раздробленность частиц дисперсной фазы, степень дисперсности δ которой есть величина, обратная среднему диаметру d частиц: $\delta = 1/d$, м^{-1} . Диспергирование грубодисперсных систем можно осуществлять химическим методом пептизации, добавляя пептизатор (диспергатор), которым может быть ПАВ, электролит или растворитель. Важно, чтобы количество пептизатора было небольшое [15]. При ТГХО диспергирование водных грубодисперсных составов осуществляют при введении 5 % ПАВ, что позволяет за счет адсорбции ПАВ реализовать эффект П.А. Ребиндера, когда при многократном снижении прочности разрушаются твердые частицы, и реализовать теорию Б.В. Дерягина, когда в результате расклинивающего давления в тонких пленках и частичного образования адсорбционных слоев происходит постепенный переход суспензии в коллоидный раствор (гидрозоли) [7].

5. Основным механизмом формирования покрытия и переноса частиц в вододисперсной среде, содержащей ПАВ, является мицеллоперенос материала [18]. В присутствии ПАВ снижается поверхностное натяжение и поверхностная энергия дисперсного раствора по сравнению с водой, за счет уменьшения межмолекулярного взаимодействия в поверхностном слое веществ; наблюдается положительная адсорбция насыщаемого вещества на поверхности твердых тел и границе раздела фаз. Согласно теории И. Ленгмюра, молекулы ПАВ, создавая мицеллы с насыщающим материалом, ориентируют их в плотном поверхностном слое твердого тела, создавая возможность контролируемого модифицирования поверхности мицеллами [18]. Массоперенос мицелл имеет место и в зоне трения, что существенно снижает изнашивание материалов.

6. Температура вододисперсной насыщающей среды ТГХО должна быть максимально высокой, близкой к кипению, поскольку с повышением температуры ускоряется движение (смещение ΔX) дисперсных частиц. Согласно М. Смолуховскому [15], броуновское движение тем интенсивнее, чем выше температура, меньше размер частиц и вязкость среды:

$$\Delta X^2 = RT/N \cdot \tau / 3\pi\eta r,$$

где ΔX – среднее смещение частицы; R – газовая постоянная, равная 8,31 Дж·моль/К; T – температура; N – число Авогадро; τ – время смещения; η – вязкость среды; r – радиус дисперсной частицы.

Объекты и методика исследований. Термогидрохимической обработке подвергали инструментальные стали P18, P6M5 и У8, твердые сплавы Т15К6, ВК8 и алмазосодержащие материалы на бакелитовой и никелевой связке. Сам процесс ТГХО осуществляли путем проведения двух операций: 1) гидрохимической обработки (ГХО) поверхности материалов при температуре 98...100 °С в течение 15...300 минут в специально приготовленном вододисперсном составе на базе ультра- и наноразмерных порошков тугоплавких соединений; термической обработки (ТО) при нагреве до 120...1050 °С и выдержке в течение 30...60 минут в окислительной или защитной среде.

Вододисперсную среду готовили путем введения в воду готовых наноразмерных частиц тугоплавких соединений либо по специальной технологии нанодиспергирования грубодисперсных частиц (до 5 мкм) тугоплавких соединений путем добавления 5 % водорастворимого ПАВа (сульфанола и др.) в водную суспензию. Готовым считался рабочий состав с кислотностью pH 6...9, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH_4OH . Изотермическую выдержку инструментальных материалов проводили в воздушной среде до 250 °С, выше этой температуры – под слоем флюса SnCl_2 или плавкого затвора B_2O_3 .

Определение триботехнических свойств стальной и твердосплавной поверхности осуществляли на микротрибометре возвратно-поступательного типа по схеме «подвижный шарик – неподвижная плоскость» в паре трения: упрочненная плоскость – сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) [1–4].

Для изучения напряженного состояния инструментальных материалов, подвергнутых ТГХО, применяли микрорентгеноструктурный анализ. Рентгеновские съемки их поверхности выполнялись на дифрактометре ДРОН-3.0 в режиме сканирования по точкам в монохроматизированном $\text{CuK}\alpha$ -излучении.

Расчет макронапряжений осуществляли по методике одной съемки, как сумму главных напряжений σ_1, σ_2 по формуле [19]:

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

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.

Результаты исследований. Процесс ТГХО имеет двойственный характер упрочнения: на поверхности инструментальных материалов осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие [1–5], в подслое формируется зона с полем высоких макронапряжений сжатия [3; 4].

Триботехнические исследования. В результате изучения влияния параметров процессов ТГХО на коэффициент сухого трения поверхности стали У8 и твердого сплава ВК6 (рис. 2, 3) установлен новый детерминированный по времени эффект упрочнения инструментальных материалов при циклической парожидкой трансформации внешней вододисперсной среды, содержащей [1–4] и не содержащей ПАВ. Это означает, что упрочнение создается только в начальный период циклической обработки, например, для стали У8 – при 50...60 мин, для сплава ВК6 – при 15 мин, а затем с увеличением времени процесса рабочие характеристики материалов снижаются.

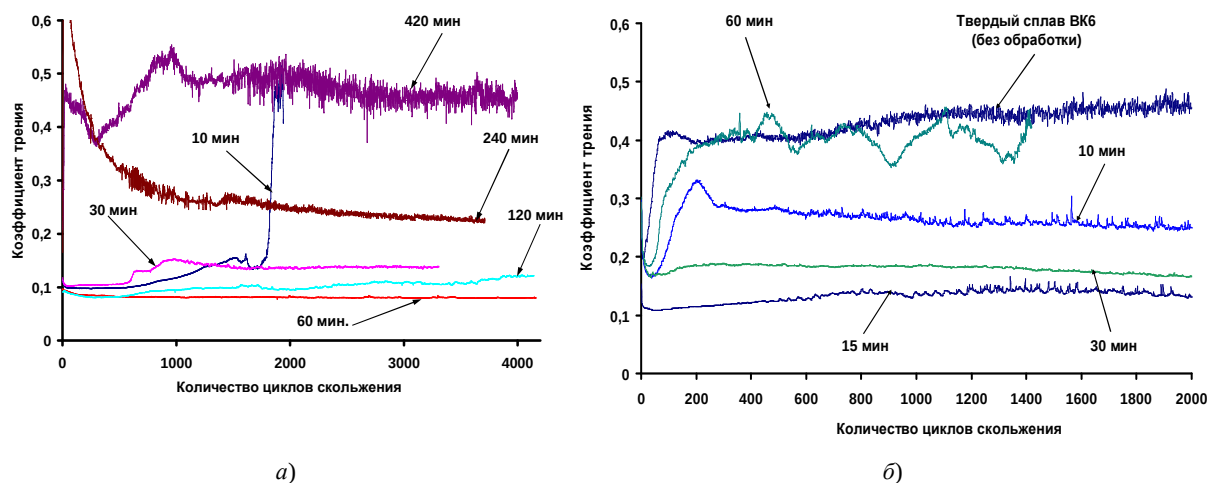


Рис. 2. Влияние времени процесса ТГХО на коэффициент трения стали У8 (а) и сплава ВК6 (б) при сухом трении скольжения.

Режим ТГХО: состав водной среды для ГХО на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3 + \text{ПАВ}$ [1; 2]

а – для У8 ГХО $T = 100$ °С; $\tau = 1...2$ ч без ТО; б – для ВК6 при ГХО $T = 100$ °С, при ТО $T = 1000$ °С $\tau = 10$ мин;
условия испытаний: нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с

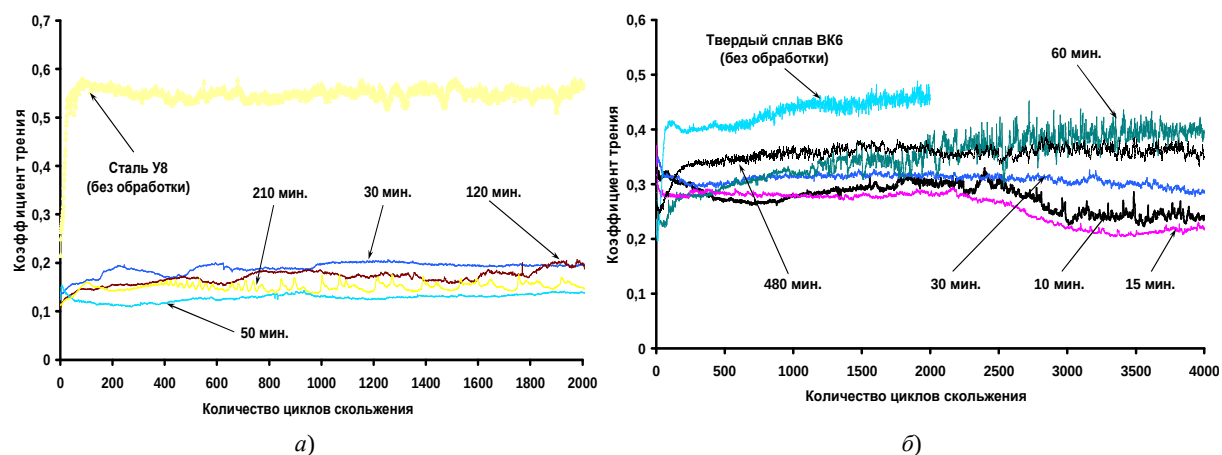


Рис. 3. Влияние времени процесса ТГХО на коэффициент трения стали У8 (а) и сплава ВК6 (б) при сухом трении скольжения.

Режим ТГХО: состав водной среды для ГХО на основе: FeO (без ПАВ)

ГХО для У8 и ВК6 при $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ без ТО;

условия испытаний: нагрузка 1 Н; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с

Оптимизация и компьютерное проектирование технологий ТГХО. В результате оптимизации процессов ТГХО стали У8 и твердого сплава ВК6 с помощью синтез-технологий определены технически оптимальные режимы и составы вододисперсных нанооксидных сред [1; 2]. Обработка инструментальных материалов по оптимальному режиму ТГХО позволяет снизить при отсутствии смазки коэффициент трения поверхности стали с 0,55...0,8 до 0,066 (в 8,3...12,1 раза), а твердого сплава – с 0,4...0,44 до 0,106 (в 3,8...4,1 раза), по сравнению с исходным состоянием. Выявлены новые особенности процессов ТГХО: 1) полученные покрытия имеют преимущества перед известными твердосмазочными покрытиями [16], поскольку не требуют приработки и сохраняют минимальные значения коэффициента трения при сухом скольжении в течение всего времени эксплуатации; 2) нанокompозитные структуры термически стабильны и после нагрева до 1035...1050 $^{\circ}\text{C}$ коэффициент трения покрытий на их основе мало уступает нанопокрyтиям, полученным в вододисперсной среде [1–4].

Напряженное состояние. Результаты рентгеноструктурного анализа представлены в таблицах 2, 3.

Таблица 2

Результаты рентгеновской съемки стали и твердого сплава [3, 4]

Материал	Режим обработки	Фаза (линия)	$2\theta_L$, град	$2\theta_0$, град	d_L , нм	d_0 , нм	σ , МПа	Плотность дислокаций, 10^9 см^{-2}
У8	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
Т15К6	без обр.	WC (211)	117,30	117,29	0,90206	0,9020	–120	1,84246
	ТГХО	[25-1047]	117,26	117,29	0,90212	0,9020	–235	2,47587
ВК6	без обр.	WC (211)	117,30	117,29	0,90203	0,9020	–71	1,96186
	ТГХО	[25-1047]	117,25	117,29	0,90209	0,9020	–210	1,97629

Таблица 3

Результаты рентгеновской съемки алмазосодержащего материала [5]

Режим обработки	Фаза	$2\theta_{\psi}^{(311)}$, град	$2\theta_0^{(311)}$, град	$d_{\psi}^{(311)}$, нм	$d_0^{(311)}$, нм	$\sin^2 \psi$	σ , МПа
Без обработки	Ni	114,7	114,68	1,0631	1,0632	0,4132	–50
	C (алмаз)	112,57	112,5	1,0761	1,0765	0,4132	≈ -700
ТГХО	Ni	114,75	114,68	1,0627	1,0632	0,4132	–180
	C (алмаз)	112,5	112,5	1,0765	1,0765	0,4132	0

Рентгеноструктурный анализ показал, что после ТГХО в оптимальном режиме на поверхности стали У8 (HRC 60), твердых сплавов Т15К6, ВК6 и никелевой связки алмазосодержащего материала формируется зона сжимающих напряжений, в то время как в алмазных зернах они максимально компенсируют-

ся до нулевого значения [3–5]. Величина макронапряжений сжатия возрастает в 1,7...3,6 раза по сравнению с необработанными материалами и сравнима с уровнем напряжений, специально создаваемых методами пластической деформации (ППД, МГПД, ИПД) [20]. Если при холодной пластической деформации сплавов создается плотность дислокаций, равная $10^{10} \dots 10^{12}$ на см^{-2} [9; 20], то при ТГХО число дислокаций существенно не меняется по сравнению с исходным состоянием.

Применение результатов исследований. Предлагаемая технология ТГХО отличается простотой, экономичностью и высокой производительностью; она является финишной операцией упрочнения инструментальных материалов. Результаты производственных испытаний показали, что ТГХО с использованием вододисперсных составов позволяет увеличить стойкость различных видов инструментов в 1,3...8 раз по сравнению с необработанными. Следует отметить, что наивысшие показатели износостойкости режущих и штамповых инструментов достигнуты при обработке труднообрабатываемых и цветных сплавов. Технология ТГХО внедрена в Беларуси на предприятиях «БелАЗ», «Мотовело», «МТЗ» и других.

Таблица 4

Результаты испытаний инструментов, подвергнутых ТГХО

Вид инструмента	Материал инструмента	Место испытаний инструмента	Стойкость K_w
Метчики, плашки	б.р. стали*	«VUNZ» (Чехия), «Daewoo» (Корея), «САЛЮТ», «УМПО», «МПЗ» (Россия), «Экран» «БелАЗ», «МТЗ»	1,5...4,8
Ленточные пилы	б. р. стали	«VUNZ» (Чехия)	2,5...3
Сверла	б. р. стали	«PS» (Словакия), «VUNZ» (Чехия), «Мотовело», «БелАЗ»	1,8...4,2
Зенкера	б. р. стали	«САЛЮТ», «Искра», ВТЗ (Россия)	1,8...3
Развертки	б. р. стали	«Мотовело», «БАТЭ», «АГУ»	1,5...3,5
Протяжка	б. р. стали	«Мотовело», «БААЗ»	2...2,5
Резцы	б. р. стали	«Мотовело», «БелАЗ»	1,3... 1,9
Долбяки	б. р. стали	«Мотовело»	1,6...2,1
Фрезы	б. р. стали	«Мотовело», «БелАЗ», «МТЗ»	2...8
Ножи для обработки стекловолокна	б. р. стали	«Skloplast» (Словакия)	1,9...2,2
Штампы холодного деформирования	штамп. стали**	«ZVL-LSA» (Словакия), «БелАЗ»	1,8...3
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	тверд. сплавы***	«БелАЗ», «БМЗ», «АГУ», «КЗТШ», «МПЗ»	1,3...2
Режущие пластины для черновой токарной обработки и фрезерования	тверд. сплавы	«САЛЮТ» (Россия), «МПЗ» «Мотовело», «БМЗ»	1,5...4
Волоки для металлокорда	тверд. сплавы	«БМЗ»	1,4...1,8
Сверла для обработки стекла	алмазсодерж.****	«Индмаш»	2,5...3,5
Шлифовальные чашки	алмазсодерж.	«БелАЗ», «МПЗ», «Калибр»	1,6...2,7

б. р. стали* – быстрорежущие стали; штамп. стали** – штамповые стали; тверд. сплавы*** – твердые сплавы; алмазсодерж.**** – алмазосодержащие материалы.

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) обнаружен и практически реализован детерминированный по времени эффект упрочнения стали и твердого сплава при термоциклической парожидкой трансформации внешней вододисперсной среды, содержащей и не содержащей ПАВ;

2) процесс ТГХО имеет двойственный характер упрочнения инструментальных материалов: на их поверхности осаждаются наноструктурированные твердосмазочные покрытия, а в подслое формируется зона макронапряжений сжатия до 200...400 МПа, сравнимых с уровнем напряжений, создаваемых методами ППД;

3) обработка инструментальных материалов по оптимальному режиму ТГХО позволяет снизить при отсутствии смазки коэффициент трения поверхности стали с 0,55...0,8 до 0,066 (в 8,3...12,1 раза), а твердого сплава – с 0,4...0,44 до 0,106 (в 3,8...4,1 раза) по сравнению с исходным состоянием;

4) разработан простой и экономичный способ термогидрохимической обработки инструментальных материалов, использование которого позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов инструментов в 1,3... 8 раз и выше по сравнению с необработанными.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. – 2010. – № 2. – С. 139–146.

2. Исследование и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 / А.А. Шматов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. – 2010. – № 8. – С. 125–133.
3. Шматов, А.А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке твердого сплава / А.А. Шматов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 2. – С. 33–40.
4. Шматов, А.А. Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке стали / А.А. Шматов, Г.К. Жавнерко, Ю.О. Лисовская // Материаловедение. – 2013. – № 1. – С. 43–50.
5. Шматов, А.А. Низкотемпературное поверхностное упрочнение алмазного инструмента / А.А. Шматов, О.О. Смиловенко // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 1. – С. 27–32.
6. Martin, J.W. Stability of microstructure in metallic systems / J.W. Martin, R.D. Doherty. – London, New York, Melbourne: Cambridge University Press, 1978. – 280 p.
7. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
8. Польшер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
9. Приходько, В.М. Металлофизические основы упрочняющих технологий / В.М. Приходько, Л.Г. Петрова, О.В. Чудина. – М.: Машиностроение, 2003. – 384 с.
10. Жуков, А.Н. Основы металловедения и коррозии: учебник / А.Н. Жуков, А.И. Малахов. – М.: Высш. школа, 1991. – 168 с.
11. Лахтин, Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
12. Щерба, В.Я. Новые композиционные материалы: учеб.-метод. компл. / В.Я. Щерба, А.Л. Лисовский. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – 220 с.
13. Антонюк, В.С. Выбор параметров покрытий с дискретной структурой при упрочнении поверхности режущего инструмента / В.С. Антонюк, Б.А. Ляшенко, Е.Б. Сорока // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 21–27.
14. Лыгденов, Б.Д. Фазовые превращения в сталях с градиентными структурами, полученными химико-термической и химико-термоциклической обработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / Б.Д. Лыгденов. – Новокузнецк, 2004. – 21 с.
15. Вассерман, И.М. Химическое осаждение из растворов / И.М. Вассерман. – Л.: Химия, 1980. – 208 с.
16. Твердосмазочные покрытия в машиностроении / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 170 с.
17. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов / Я.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 2. – 135 с.
18. Поляченко, О.Г. Физическая и коллоидная химия / О.Г. Поляченко, Л.Д. Поляченко. – Могилев: УО «МГУП», 2008. – 196 с.
19. Горелик, С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 107 с.
20. Научные основы повышения малоциклового прочностного / Н.А. Махутов [и др.]; под ред. Н.А. Махутова. – М.: Наука, 2006. – 623 с.

Поступила 07.05.2014

STRENGTHENING EFFECT OF THERMO-HYDROCHEMICAL TREATMENT FOR TOOL MATERIALS

A. SHMATOV

The results of development for the methodological principles of creating thermo-hydrochemical treatment (THCT) are presented in the paper. The process involves (1) the chemical treatment of surface in an special aqueous nano-sized suspension and (2) subsequent heat treatment. The stress state and properties of tool materials, subjected to THCT process, are examined. Developed technology permits increasing the wear resistance of steel, carbide and diamond tools by the factor of 1.3...8 in comparison with untreated its.

УДК 621.793.7.001.5

**ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
АВТОМОБИЛЕЙ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ***канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет, Беларусь);**Т.В. ВОРОНА, С.А. ДОВЖУК**(Кировоградский национальный технический университет, Украина);**Ю.В. БРУСИЛО, канд. техн. наук, доц. Р.М. САЛИМОВ**(Национальный авиационный университет, Украина);**Ю.В. ВОЛКОВ**(Одесская национальная морская академия, Украина)*

Представлен сравнительный анализ технических характеристик и технологических параметров выпускаемого в настоящее время отечественного и зарубежного оборудования для электродугового напыления. Даны рекомендации по выбору оборудования для упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта. Показано, что правильный выбор конструкции оборудования для напыления позволяет увеличить скорость и температуру струи транспортирующего газа и частиц, уменьшить диаметр капель, повысить плотность и снизить окисляемость покрытий. Использование в качестве распыляющего газа продуктов сгорания пропано-воздушной смеси позволит активировать процесс электродугового напыления.

Введение. Повышение долговечности деталей автомобильного транспорта является важнейшей задачей отрасли. Увеличить долговечность деталей автомобилей и тем самым уменьшить зависимость от зарубежных поставщиков по основным наиболее дорогостоящим и металлоемким деталям позволит использование технологий упрочнения новых деталей и восстановление изношенных. Способ упрочнения и восстановления деталей должен обеспечивать их высокий ресурс, экологическую чистоту производства, быть достаточно универсальным, простым и доступным.

В мировой практике по разработке и применению технологий упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта все большее внимание уделяется электродуговому напылению (ЭДН) [1–6]. Это обусловлено многими достоинствами метода, однако в первую очередь тем, что разработанное оборудование для электродугового напыления позволяет наносить покрытия по качеству, не уступающему покрытиям, нанесенным плазменным и детонационным методами.

Постановка проблемы. Качество наносимого покрытия, производительность процесса в значительной мере зависят от технических характеристик применяемого оборудования. При этом решающее влияние на эксплуатационные свойства покрытия оказывает конструкция оборудования. В настоящее время в эксплуатации находится широкая номенклатура установок для электродугового напыления различных фирм. Однако недостаточно изучено влияние основных технических характеристик установок для напыления на физико-механические свойства получаемых покрытий и не проведен их сравнительный анализ, не разработаны научно обоснованные рекомендации по взаимозаменяемости и применению оборудования для электродугового напыления. Все это затрудняет правильный выбор оборудования для организации участков электродугового напыления и применение технологических процессов, обеспечивающих высокую производительность и качество покрытий, соответствующих современному мировому уровню развития данной области техники.

Электродуговое напыление находит в настоящее время самое широкое применение, особенно в европейских странах, и постепенно вытесняет традиционный газопламенный метод. Это связано [2; 4] в основном с более высокой производительностью электродугового метода (в 3...4 раза выше, чем при газопламенном напылении), распространенностью и доступностью источника энергии для плавления металла, с получением более качественных покрытий с несколько большей прочностью сцепления с основным металлом, возможностью механизации и автоматизации процесса. Электродуговой метод обладает более высокой тепловой эффективностью, достигающей 57 %, по сравнению с 13 и 17 % при газопламенном и плазменном напылении соответственно. Поэтому в последнее время наметилась тенденция к замене газопламенного напыления электродуговым напылением.

Анализ публикаций и практических разработок. Анализ научно-технических источников и практических исследований за последнее десятилетие показали [1–9], что развитие оборудования для электродугового напыления идет по пути расширения технологических возможностей и увеличения ресурса работы, повышения производительности и удобства эксплуатации, сокращения потерь напыляемого материала и повышения качества покрытий. При этом основные усилия направлены на решение задачи

управления параметрами газотермического потока: скоростью и температурой газа и частиц, коэффициентом сосредоточенности потока, гранулометрическим составом частиц, свойствами частиц и несущей среды.

Ведущие фирмы в области разработки и производства оборудования для газотермического напыления создают модульные системы установок электродугового напыления (таблица), большим преимуществом которых является совместимость отдельных узлов, таких как электрометаллизаторы, пакеты шлангов и т.д., со всеми источниками питания и специальной оснасткой, входящими в систему.

Характеристика современных установок для электродугового напыления

Установка, фирма, страна	Ток, А	Материал	Производительность, кг/ч
Ares-pray, SNMI Франция	200...800	Сталь, алюминий, цинк	7...30; 3,5...15; 16...65
VT-600, Colmo-поу, США	До 500	Сталь, алюминий, цинк	25,4; 13,6; 70,7
ELMET-P2, RUKOV, Чехия	200...400	Алюминий, цинк	25; 66
LD/U2, OSU, Германия	До 200	Сталь, алюминий, цинк	9,5...10,2; 6; 20
LD/U3, OSU, Германия	До 300	Сталь, алюминий, цинк	14,2...15,3; 9; 30
LD/S2, OSU, Германия	до 1400	Сталь, алюминий, цинк	65,8; 37,1; 140
ЭМ-14, Россия	До 320	Сталь, алюминий, цинк	10; 8; 30
ЭМ-14М, Россия	50...400	Алюминий, цинк	до 12,5; до 40
ЭМ-17, Россия	50...400	Сталь, алюминий, цинк	до 18; до 12; до 40
ЭДМ-5, Россия	До 400	Сталь, алюминий	до 20; до 10
ЭМГ-2, Украина	До 400	Сталь	18,8
ЭМП-1, Украина	До 300	Сталь, алюминий	24; 14
УСЗМ-2М, Украина	до 400	Сталь	до 20
РЕ-2, Польша	до 300	Сталь, алюминий	12; 8
АДМ-8, Беларусь	до 500	Сталь, алюминий, цинк	30; 18; 40
АДМ-10, Беларусь	до 380	Сталь, алюминий, цинк	18,4; 6,5; 16,8

С целью получения покрытий с высокими характеристиками прочности сцепления, плотности, износостойкости и, следовательно, повышения ресурса деталей автомобилей был сделан сравнительный анализ технических характеристик и технологических параметров выпускаемого в настоящее время отечественного и зарубежного оборудования для электродугового напыления, а также качества получаемых покрытий с использованием современных установок и указанного метода, что явилось задачей настоящего исследования.

Характеристика и особенности оборудования для электродугового напыления. Результаты экспериментальных исследований. Наилучшими показателями обладает оборудование, разработанное Физико-механическим институтом НАН Украины (г. Львов) совместно с ГМП «Газотермик» при ФМИ НАН Украины, и оборудование, производимое НПО «МАД» (г. Минск, Беларусь).

В Физико-механическом институте НАН Украины (г. Львов) путём совершенствования конструкции оборудования для электродугового напыления и повышения защитно-энергетического уровня факела распыла была решена задача повышения физико-механических свойств покрытий за счёт снижения окисления диспергированного металла в факеле распыла и повышения скорости полёта частиц [7].

Оборудование для электродугового напыления монтируется на суппорте токарно-винторезного станка 16K20 (рис. 1) и состоит из приводного механизма и механизма подачи, системы распыления. В приводной механизм станка входит электропривод (двигатель переменного тока) и одноступенчатый червячный редуктор с горизонтальной приводной осью. Выходные концы оси в верхней части оборудования роликми, которые служат активными протяжными элементами правой и левой части механизма протяжки электродных проволок. Прижатие проволоки осуществляется пассивными роликми, которые размещены в откидной крышке металлизатора. Правая и левая части подающего механизма электроизолированы между собой и корпусом металлизатора. Изменяя скорость вращения шпинделя и расстояние между суппортом и шпинделем, осуществляется регулирование скорости перемещения установки для электродугового напыления относительно поверхности образца и дистанции напыления. Толщина напыленного слоя регулируется скоростью перемещения металлизатора и числом его проходов относительно поверхности покрытия.

Принцип работы металлизатора состоит в непрерывной подаче двух проволок в распылительную головку, где между ними горит дуга. Расплавленный дугой материал проволок направленным потоком сжатого воздуха переносится на подготовленную поверхность металла. Система распыления представляет собой головку с соплом и направляющими наконечниками, в последние подаются две электродные проволоки и воздух под рабочим давлением. Токоподающие кабели крепятся к кронштейнам, которые размещены в передней части металлизатора.

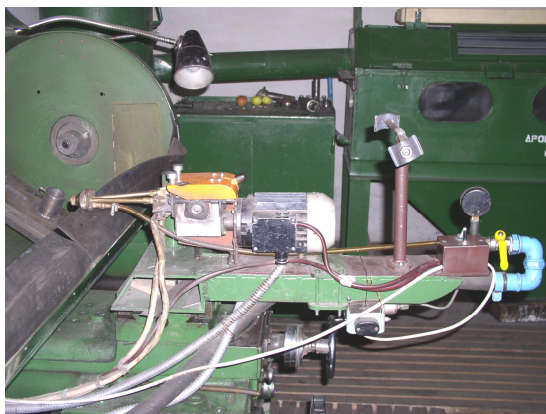


Рис. 1. Установка для электродугового напыления с металлизатором ЭМ-14

Для нанесения покрытий используются аппараты с различной дутьевой системой и геометрией сопла. В настоящее время известно несколько схем формирования гетерогенного металловоздушного потока при электродуговом напылении: диафрагмовая, центральносопловая, дифференциальная и закрытая [7]. В серийном производстве самое широкое распространение получила диафрагмовая схема, которая, в частности, использована при изготовлении установок для электродугового напыления Барнаульского аппаратно-механического завода (Россия) и фирм «Metco» и «Mogul» (США). При использовании этой схемы формируется достаточно широкий металловоздушный поток. Применение этой дутьевой системы эффективно для нанесения антикоррозионных покрытий. Центрально-сопловая схема использована в металлизаторе ЭМ-17 (Барнаул), где создается узкий металловоздушный поток, который является особенно эффективным при нанесении покрытий на тела вращения, например, на валы, в том числе и коленчатые [7; 10].

С целью повышения качества покрытий целесообразно использовать распылительную головку для металлизатора, в основу которой положена закрытая схема формирования металловоздушного потока. В работе [7] отмечается преимущество аппаратов с закрытой схемой и дифференциальным соплом по сравнению с открытой схемой центрального сопла. Закрытая схема формирования металловоздушного потока позволяет использовать чрезвычайно мелкие фракции распыляемых частиц (диаметром менее 50 мкм), которые обладают высокой скоростью полета – 50...130 м/с (рис. 2).

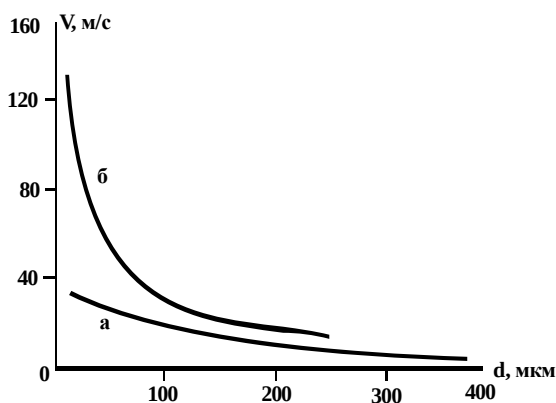


Рис. 2. Зависимость скорости полета частиц расплава металла от их размера при реализации различных схем формирования металловоздушного потока:
а – центрально-сопловая схема; б – закрытая схема

Такую схему распыления следует использовать, когда возникает необходимость нанесения мелко-дисперсного покрытия (50...200 мкм) распылением порошковых проволок, в состав шихты которых входят тугоплавкие компоненты. Закрытая схема формирования металловоздушного потока использована в аппаратах производства ГП «Газотермик» при ФМИ НАН Украины. Закрытая схема имеет свои преимущества в том случае, когда размер дуги в сечении становится соизмеримым с сечением цилиндрического канала, в котором она горит. Закрытая схема формирования металловоздушного потока позволяет реализовывать два режима напыления: непрерывный и импульсный. При уменьшении диаметра цилиндрической

части сопла давление в сопле может стать равным давлению в дуговом промежутке. При таком соотношении давлений холодный воздух активно будет проникать в зону горения дуги и обусловит сокращение ее длины. Когда длина сократится настолько, что расплав замкнет дуговой промежуток, возникает импульсный режим. Соотношение давлений в дуге сильно зависит от диаметра сопла и мощности дуги. Экспериментально установлено, что чем больше диаметр сопла, тем большей должна быть мощность дуги, чтобы реализовался импульсный режим работы аппарата. При работе аппарата для ЭДН в импульсном режиме торцы проволоки, которые плавятся, становятся параллельными между собой. При жидкой фазе, когда торцы электродов-проволок замыкаются, реализуется рейкотронный эффект. Рейкотронный эффект проявляется в том, что в щели между двумя параллельными направляющими электродами действует электродинамическая сила, которая направлена параллельно к поверхностям электродов, которые плавятся. Расплав выбрасывается электродинамическими силами из промежутка и возникает пауза, после которой цикл повторяется. Частота выбросов зависит от скорости подачи проволоки-электрода. Чем выше скорость подачи проволоки, тем выше частота выброса расплава. При таком способе электродугового напыления за счет рейкотронного эффекта порции жидкого металла получают дополнительный импульс, который повышает скорость полета в начальный момент и способствует диспергированию расплава. При использовании «закрытой» схемы максимальный размер распыленных частиц не превышает 50 мкм.

Оборудование для электродугового напыления характеризуется следующими параметрами: напряжение 18...36 В; сила тока 50...600 А; мощность дуги 5...20 кВт; расстояние от сопла до напыляемой поверхности 50...200 мм; скорость продольного перемещения металлизатора 5...10 мм/об; частота вращения вала 0...60 об/мин; давление сжатого воздуха (распыляющего газа) 0,35...0,5 МПа; расход сжатого воздуха (распыляющего газа) 60...150 м³/ч; диаметр проволоки 1,6...2,0 мм; скорость подачи проволоки 0,05...0,35 м/с.

Установки для электродугового напыления, производимые НПО «МАД» (г. Минск), соединяют в себе достоинства электродугового и высокоскоростного напыления. Отличительной особенностью является наличие малогабаритной высокоэффективной камеры сгорания пропано-воздушной смеси, которая используется в качестве транспортирующего газа. Продукты сгорания образуют на выходе из сопла сверхзвуковую струю со скоростью свыше 1500 м/с при 2200 К (рис. 3). Важное достоинство предлагаемой аппаратуры – работа камеры сгорания на пропано-воздушной смеси. Отсутствие кислорода в качестве окислителя топлива значительно снижает себестоимость наносимых покрытий и повышает надежность и безопасность проводимых работ. Оригинальная конструкция камеры сгорания, использование эффективного катализатора горения, отсутствие водяного охлаждения камеры и наличие устройства автоматического поджига смеси существенно повышают надежность оборудования и облегчают работу обслуживающего персонала.



Рис. 3. Аппарат для электродугового напыления с камерой сгорания

Аппарат имеет следующие технические характеристики:

- диаметр применяемой проволоки 1,5...2,2 мм;
- максимальный рабочий ток 380 А;
- расход воздуха 60 м³/ч;
- расход пропан-бутана 0,011 кг/ч;
- габариты 290 × 255 × 75 мм; масса аппарата 3,1 кг;
- производительность, кг/ч: по стали – 18,4; по алюминию – 6,5; по цинку – 16,8 при диаметре проволоки 2 мм.

В состав оборудования для электродугового напыления входит: установка для электродугового напыления; электрический блок управления; коробка распределения; воздушно-силовые шланги по 2,5 м; высоковольтный провод длиной 2,5 м; комплект быстроизнашивающихся деталей. Установка для электродугового напыления содержит аппарат для электродугового напыления, пульт управления и блок коммутации. В качестве источника питания хорошо зарекомендовал себя типовой сварочный источник с жесткой характеристикой ВДУ-506. Аппарат комплектуется соединительными кабелями с коммутирующей коробкой и пультом управления.

Конструктивные достоинства предлагаемого оборудования – быстросъемные распылительные головки; легкая и быстрая замена проволок и переход с одного диаметра проволоки на другой; высокая электротермозащищенность; отсутствие регулировок; быстрый доступ ко всем узлам аппарата; простые и быстро заменяемые токосъемные элементы; замена подающих роликов без разборки аппарата; блочно-узловая сборка предполагает быстрое техобслуживание и ремонт.

В основе работы установок лежит процесс плавления проволок электрической дугой и распыление расплавленного металла высокоскоростной струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси. В аппаратах используются восстановительные транспортирующие газы с оригинальной подачей через профилированные сопла, камера сгорания в системе подачи газов, особое взаимное расположение токоподводов и распыляющего сопла. Скоростной напор потока, выражающийся отношением кинетической энергии к единице объема газа и характеризующий силу, действующую на частицу в потоке, составляет 234 кПа, по сравнению с 75 кПа при традиционном электродуговом напылении. При этом частицы расплавленного металла разгоняются в потоке до скорости 500 м/с и формируют покрытие, которое имеет прочность сцепления вдвое выше, чем при традиционном электродуговом напылении и достаточное для работы в самых экстремальных условиях, в том числе и при наличии ударно-абразивного изнашивания. Использование в качестве распыляющего газа продуктов сгорания пропано-воздушной смеси значительно снижает окисление напыляемого материала и выгорание легирующих элементов. При равном соотношении воздуха и пропана покрытие содержит углерода вдвое меньше, чем в исходном материале, а при распылении чистым воздухом (традиционное ЭДН) содержание углерода уменьшается почти в три раза. Условия образования, транспортировки частиц и формирования покрытия, отличные от других методов газотермического напыления, приводят к образованию иных структур в материале покрытия. Малое количество хрупких оксидов, значительное количество интерметаллидов, наряду с образованием закалочных структур и достаточно высокой пластичностью напыленного слоя, создают предпосылки для использования данного оборудования при упрочнении и восстановлении ответственных деталей автомобилей и существенно расширяют номенклатуру обрабатываемых деталей. Кроме того, в условиях высокоскоростного напыления происходит изменение коэффициента сосредоточенности материала в струе в сторону его увеличения, поскольку угол расхождения двухфазных сверхзвуковых струй меньше, чем дозвуковых, и составляет 5...7°. Как следствие, уменьшается диаметр пятна напыления, возрастает коэффициент использования материала. Он достигает величины 0,85, против 0,75 при традиционном электродуговом напылении.

Таким образом, к основным достоинствам аппаратов можно отнести:

- снижение окисления напыляемого материала и выгорания легирующих элементов;
- увеличение скорости частиц напыляемого материала;
- угол раскрытия струи не превышает 10 градусов;
- коэффициент использования материала увеличивается до 0,85 (против 0,75 у обычных аппаратов для ЭДН).

Так, на основании анализа результатов научно-технических, практических и экспериментальных исследований были сделаны следующие **выводы**:

- основным преимуществом метода электродуговой металлизации является его высокая производительность, которая достигает 50 кг/ч – максимальное значение энергетических КПД распыления и напыления;
- основным недостатком электрометаллизационных покрытий является относительно низкая плотность и прочность сцепления (20...30 МПа), что отрицательно влияет на качество покрытий и эксплуатационные свойства.

Устранить эти недостатки и сохранить преимущества метода электродугового напыления позволит использование для нанесения покрытий установки для электродугового напыления ЭМ-14 с закрытой схемой формирования металловоздушного потока и аппарата для активированного электродугового напыления АДМ-8. Применение закрытой схемы формирования металловоздушного потока при электродуговом напылении [7] обеспечит получение покрытия с высокой плотностью и прочностью сцепления до 180 МПа.

Совершенствование оборудования для напыления [1–10] позволит увеличить скорость и температуру струи транспортирующего газа и частиц, уменьшить диаметр капель, повысить плотность и снизить окисляемость покрытий.

Используемые в качестве распыляющего газа продукты сгорания пропано-воздушной смеси активируют процесс электродугового напыления. Варьированием расходов пропана и воздуха можно создавать нейтральную или восстановительную среду в зоне плавления электродной проволоки и тем самым снижать окисление металла и выгорание легирующих элементов [2; 4; 5]. Горение пропано-воздушной смеси можно рассматривать как дополнительный источник нагрева [2–5].

Таким образом, для упрочнения и восстановления деталей автомобильного транспорта можно рекомендовать установки для электродугового напыления ЭМ-14 с закрытой схемой формирования металловоздушного потока и аппараты для активированного электродугового напыления АДМ-8. Конструкция выбранного оборудования обеспечивает создание покрытий разного функционального назначения с высокими эксплуатационными свойствами, что является важным показателем для повышения ресурса деталей автомобильного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мчедлов, С.Г. Газотермическое покрытие в технологии упрочнения и восстановления деталей машин / С.Г. Мчедлов // Сварочное производство. – 2007. – № 10. – С. 35–45.
2. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 1998. – 583 с.
3. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 250 с.
4. Куприянов, И.Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И.Л. Куприянов, М.А. Геллер. – Минск: Беларус. навука, 1990. – 176 с.
5. Электродуговая металлизация – перспективный метод нанесения защитных покрытий / И.Л. Куприянов [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 1988. – 321 с.
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справ. / Ю.С. Борисов [и др.]. – К.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
7. Студент, М.М. Розробка захисних та відновних електрометалізаційних покриттів з використанням порошкових дрітків: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.01 / М.М. Студент. – Львів, 1998. – 18 с.
8. Оборудование для восстановления деталей: каталог. – М.: Информагротех, 1990. – 40 с.
9. Каталог сварочного оборудования, расходных материалов, вспомогательного оборудования, сырья для изготовления электродов, газосварочного оборудования, оборудования для специальных способов сварки, резки, наплавки и напыления. – К.: Салон «Сварка», 1994. – 100 с.
10. Воропай, Н.М. Распределение температуры в воздушной струе и напыляемой основе при электродуговой металлизации / Н.М. Воропай, А.И. Мажейка, С.И. Маркович // Автоматическая сварка. – 2004. – № 5. – С. 18–21.

Поступила 11.07.2014

SAMPLING OF THE EQUIPMENT FOR THE REINFORCEMENT AND RESTORATION OF RECIPROCATING ENGINES DETAILS BY THE ELECTRIC ARC SPRAYING

**A. DUDAN, T. VORONA, S. DOVZHUK, J. BRUSILO,
R. SALIMOV, YU. VOLKOV**

The comparative assaying of technical datas and technological parameters of the domestic now domestic and foreign equipment for an electric arc spraying is presented. Recommendations for choice the equipment for a reinforcement and restoration of details the explosive motors are given. It is displayed, that correct sampling of a construction of the equipment tor a spraying allows to augment speed and temperature of a stream of carrying gas and corpuscles, to diminish diameter of drops, to raise density and to lower oxidizability of coverages. Use of in the capacity of volatilising gas of products of combustion of propane-air mixture will allow activating process of an electric arc spraying.

УДК 621.436.004.67

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ОБКАТКИ РЕМОНТИРУЕМЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. В.Г. АНДРУШ

(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)

Представлены результаты исследования стендовой обкатки ремонтируемых дизелей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 на различных режимах. Об износе и интенсивности изнашивания судили по изменению содержания железа в обкаточном масле, контролировалась динамика изменения мощности механических потерь и температура масла во время обкатки. По результатам испытаний выбран рациональный режим обкатки двигателей.

Введение. Капитальный ремонт машины обходится в 2...3 раза дешевле приобретения новой. Отношение стоимости капитального ремонта машины к цене новой уменьшилось в последнее время с 30...40 до 20...28 %, а двигателей – с 40...60 до 22...30 %. Эти изменения вызваны ростом цен на новую технику и снижением стоимости ремонта, что экономит около 50 млрд. руб. в сравнении с закупкой такого же количества новых двигателей [1]. В настоящее время в сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь эксплуатируется около 95 тысяч дизельных двигателей, в том числе: на тракторах – 53, зерноуборочных комбайнах – 12, автомобилях – 20, кормоуборочных комбайнах и другой специальной технике – 10. Количество отказов и неисправностей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в общей структуре отказов для отдельных машин достигает 35...55 % [2, с. 39]. Двигатели ЯМЗ-236, -238, -240 и их модификации широко используются не только в автомобилях, но и в сельскохозяйственной технике, их ремонтируют на 12 специализированных предприятиях системы агросервиса Республики Беларусь (на 5 мотороремонтных заводах, в 4 райагросервисах и в 3 райагропромтехниках).

Существующие режимы обкатки рассчитаны на ремонтируемые двигатели с усредненными выходными параметрами, без учета индивидуальных показателей. Как показала практика, одни двигатели достигают состояния обкатанных в более короткие сроки, чем по установленному режиму, другие – с большой мощностью механических потерь в начале обкатки – не успевают приработаться, перегреваются и даже заклинивают. Исходя из этого стоит задача выбора рационального режима стендовой обкатки двигателей, чтобы на его основе в дальнейшем разработать алгоритма селективного управления обкаткой двигателей в зависимости от их технического состояния.

В соответствии с нормативно-технической документацией обкатка двигателей, являясь завершающей операцией ремонта, осуществлялась на обкаточно-тормозном стенде модели КИ-5274-ГОСНИТИ. Для сборки двигателей использовались детали, восстановленные по технологиям Минского авторемонтного завода, при этом проверялось соответствие технической документации основных деталей двигателя. Техническое состояние двигателя в целом оценивалось начальной мощностью механических потерь. В зависимости от величины этого параметра принималось решение о готовности двигателя к стендовым испытаниям.

Основная часть. Износ и интенсивность изнашивания контролировались методом спектрального анализа. В каждый двигатель перед обкаткой заливали свежее масло. Пробы масла для спектрального анализа брались перед его заливкой в двигатель, затем через каждые 5 или 10 мин в зависимости от продолжительности этапа, а также после каждого этапа приработки. Отбор проб масла производился шприцем с наконечником из картера двигателя через отверстие масломерной линейки. Масло отбиралось с уровня на 25...30 мм ниже отметки на масломерной линейке, указывающего минимально допустимый уровень масла.

Температура воды и масла измерялась с погрешностью ± 2 %, давление воды и масла в системе охлаждения и смазки – с погрешностью $\pm 1,0$ %. Частота вращения определялась измерителем цифровым тахометрическим с погрешностью $\pm 0,5$ %. Измерение крутящего момента осуществлялось с помощью маятникового силоизмерительного механизма с погрешностью $\pm 1,0$ %, предел измерения 0...1800 Нм. Расход топлива измерялся устройством с погрешностью $\pm 1,0$ %.

Температура охлаждающей воды поддерживалась в следующих пределах: на стадии холодной обкатки 55 ± 5 °С, горячей 70 ± 10 °С, температура масла при горячей обкатке 80...95 °С, при максимальном нагрузочном режиме температура воды не превышала 90 °С, масла – 100 °С.

Мощность механических потерь $N_{мп}$ определялась для каждого двигателя до окончания каждого этапа приработки и после при частоте вращения коленчатого вала 500 мин⁻¹:

$$N_{мп} = M_{кр} \cdot n / 9550, \text{ кВт},$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, Н·м; n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

Крутящий момент двигателя $M_{кр}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$M_{кр} = P_{Вес} \cdot l,$$

где $P_{Вес}$ – показание измерительного устройства стенда, Н; l – плечо весового устройства стенда ($l = 0,7162$ м).

Испытания двигателей проводились по последовательному плану: первоначально обкатка выборок двигателей осуществлялась по используемому на заводах более продолжительному режиму (табл. 1); затем – по разработанному промежуточному (табл. 2); далее – самому кратковременному режиму (табл. 3).

Таблица 1

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 [3, с. 256]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Мощность, кВт		Продолжительность, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Холодная	500...600	–	–	40
–"	700	–	–	30
На холостом ходу	1000	–	–	15
Горячая под нагрузкой	1700	44	60	25
То же	1800	52	68	20
–"	1900	78	90	30
–"	2000	104	137	20
Итого				180

Таблица 2

Промежуточный режим обкатки двигателей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238

Стадия и этап обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Мощность, кВт		Продолжительность, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Холодная	800	0	0	30
То же	1200	0	0	25
–"	1400	0	0	10
Всего				65
На холостом ходу	1500	0	0	10
Горячая под нагрузкой	1600	22	44	10
То же	1700	44	66	10
–"	1800	66	88	10
–"	1900	88	110	10
–"	2000	102,5	138,5	10
Всего				50
Итого				125

Таблица 3

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236, -236М и ЯМЗ-238, -238М [4, с. 200]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Мощность, кВт		Продолжительность, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Холодная	800	0	0	20
–"	1200	0	0	20
–"	1400	0	0	10
Всего				50
На холостом ходу	1500	0	0	10
Горячая под нагрузкой	1600	22	30	10
То же	1700	44	60	10
–"	1800	66	88	5
–"	1900	88	110	5
–"	2000	102	138	5
Всего				35
Итого				95

О динамике износа деталей судили по изменению содержания железа в обкаточном масле. Результаты измерения в зависимости от продолжительности обкатки и частоты вращения коленчатого вала приведены на рисунках 1 и 2.

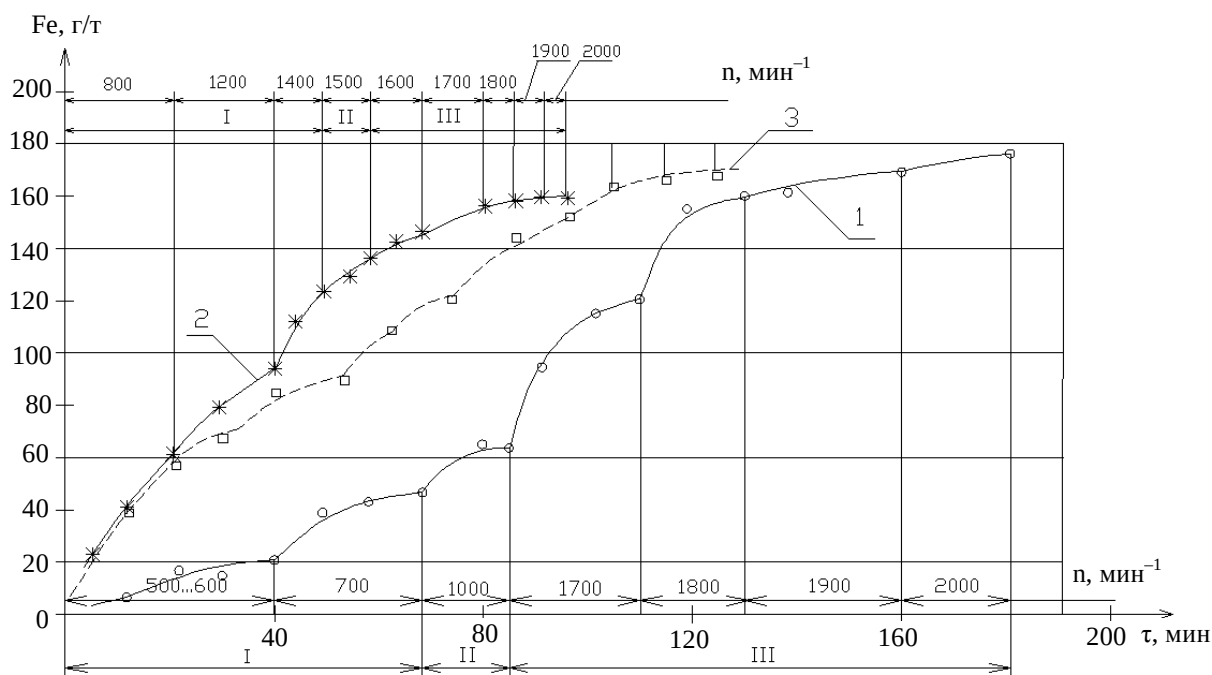


Рис. 1. Динамика износа деталей двигателя ЯМЗ-236:

1 – режим обкатки по таблице 1; 2 – режим обкатки по таблице 3; 3 – режим обкатки по таблице 2

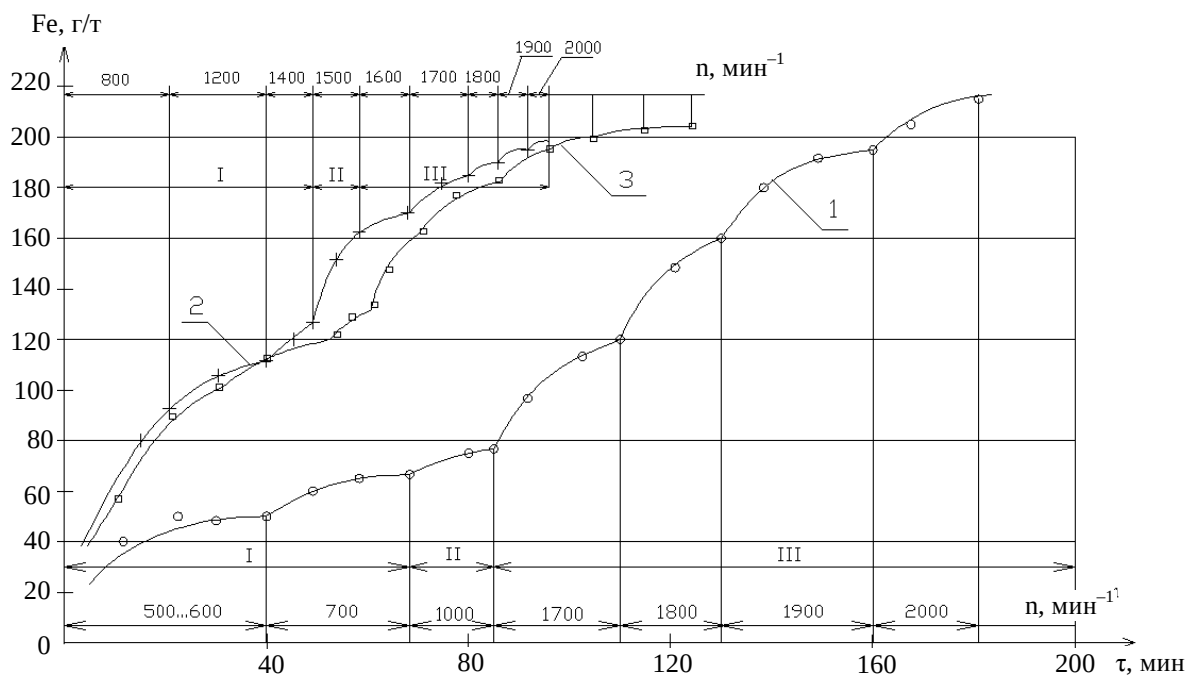


Рис. 2. Динамика износа деталей двигателя ЯМЗ-238:

1 – режим обкатки по таблице 1; 2 – режим обкатки по таблице 3; 3 – режим обкатки по таблице 2

Износ по стадиям приработки распределился следующим образом:

- для двигателя ЯМЗ-236 (кривая I, рис. 1) – холодная обкатка – 28, на холостом ходу – 10, горячая под нагрузкой – 62 %;
- для двигателя ЯМЗ-238 (кривая I, рис. 2) – холодная обкатка – 31, на холостом ходу – 6, горячая под нагрузкой – 63 %.

Следовательно, износ протекает весьма неравномерно, основная его доля приходится на стадию горячей обкатки. При этом средняя интенсивность изнашивания (отнесенная к одной тонне смазочного масла) на стадии холодной обкатки составляет 0,7 и 0,93 г/т·мин, а на стадии горячей обкатки под нагрузкой – 1,15 и 1,58 г/т·мин или превышает в 1,6 и 1,7 раза для двигателей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 соответственно. Наибольшая интенсивность изнашивания возникает на первом этапе горячей обкатки при частоте вращения коленчатого вала 1700 мин^{-1} и равна 2,2 г/т·мин при тормозной мощности 44 кВт для ЯМЗ-236 и 1,8 г/т·мин при тормозной мощности 60 кВт для ЯМЗ-238. Появление такого существенного износа на первом этапе горячей приработки сопровождается скачкообразным ростом температуры масла. Если прирост температуры масла за весь период обкатки двигателя, т.е. за 180 мин составил 45°C , то за первый этап горячей обкатки под нагрузкой продолжительностью 25 мин – 15°C (рис. 3).

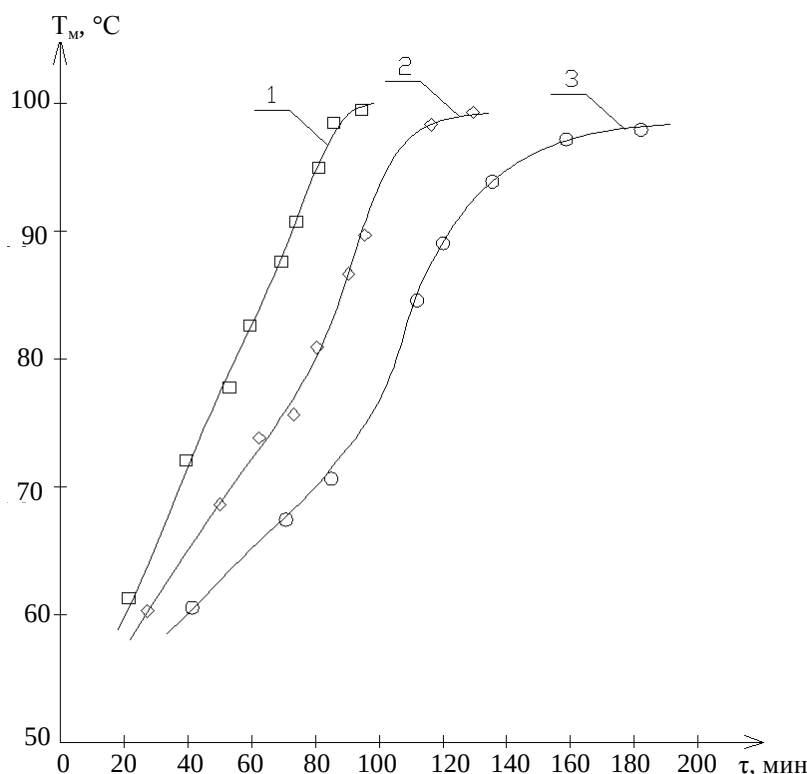


Рис. 3. Зависимость температуры масла от времени обкатки двигателя ЯМЗ-236:

1 – сокращенный режим обкатки по таблице 3; 2 – режим обкатки по таблице 2; 3 – режим обкатки по таблице 1

Резкое повышение температуры масла свидетельствует о динамическом изменении нагрузочного режима. Действительно, переход со стадии холостого хода с частотой вращения коленчатого вала, равной 1000 мин^{-1} , на стадию горячей приработки с тормозной мощностью 44 кВт и частотой вращения коленчатого вала, равной 1700 мин^{-1} , сопровождается более чем 3-кратным увеличением удельных давлений, действующих на пару трения «шатунная шейка – подшипник» от инерционных сил.

Как уже отмечалось, на стадии холодной обкатки ($n = 500...700 \text{ мин}^{-1}$) при незначительных инерционных нагрузках и скоростях взаимного скольжения поверхность заполировывается. Она не обладает достаточной износостойкостью и начинает интенсивно изнашиваться с повышением нагрузок. Последнее сопровождается вырыванием отдельных частиц металла, местным выкрашиванием антифрикционного слоя коренных вкладышей, задирами поршней с наволакиванием металла на поверхность зеркала цилиндра.

При холодной обкатке на этом режиме амплитуда удельных давлений в парах трения КШМ недостаточна для образования новой микрогеометрии поверхности за счет износа. Этот процесс интенсивно протекает только на стадии горячей обкатки под нагрузкой.

На втором этапе горячей обкатки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ интенсивность изнашивания продолжает оставаться высокой – 2 г/т·мин. Только на двух заключительных этапах обкатки в результате приработки начинается формирование новой поверхности, обладающей достаточной несущей способностью. Динамика износа этого периода обкатки характеризуется удельными износами, составляющими 6 и 15 % при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, 4 и 8 % при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ соответственно для двигателей ЯМЗ-238 и ЯМЗ-236. Относи-

тельно незначительные износы в период окончания приработки под нагрузкой дают основание предположить, что вновь сформированные трущиеся поверхности обладают достаточной износостойкостью структурой, препятствующей появлению задиров в эксплуатации. Однако при отсутствии явления заполирования поверхностей процесс формирования износостойких структур мог начаться раньше с улучшением качества приработки. Учитывая это обстоятельство, в целях исследования изменения динамики износа был разработан и испытан промежуточный режим обкатки (см. табл. 2), в котором, по сравнению с более продолжительным (см. табл. 1), на стадии холодной приработки существенно повышена частота вращения коленчатого вала, а по сравнению с более сокращенным (см. табл. 3) – удлин timer продолжительность приработки на ступенях.

При разработке промежуточного режима преследовалась цель частично «сместить» центр тяжести процесса изнашивания из области горячей в область холодной обкатки, не увеличивая абсолютных значений износа за весь период приработки, обеспечить его более равномерное распределение по этапам и избежать появления глянцевого блеска поверхностей.

Отличительные особенности этих режимов, в сравнении с принятыми (см. табл. 1), – введение 3-этапной приработки на стадии холодной обкатки с увеличением частоты вращения коленчатого вала в конце холодной обкатки с 700 до 1400 мин⁻¹, а на стадии холостого хода – с 1000 до 1500 мин⁻¹. Начальная частота вращения коленчатого вала при горячей обкатке под нагрузкой составила 1600 вместо 1700 мин⁻¹. При этом перепад удельных давлений от инерционных сил на пару трения «шатунная шейка – подшипник» при переходе от холодной к горячей обкатке под нагрузкой сократился с 3-кратного до 1,5 раза. В целом произошло сглаживание режима нагружения.

На стадии горячей обкатки под нагрузкой режим обкатки задавался исходя из условия равномерного линейного приращения тормозной мощности.

Такая зависимость совпадает с характером изнашивания поршневых колец, так как последнее пропорционально среднему эффективному давлению.

При испытаниях двигателей по промежуточному режиму было замечено, что на стадии холодной обкатки принятая продолжительность этапов (30 и 25 мин) приводила к образованию на кривой износа горизонтальных участков, свидетельствующих о стабилизации интенсивности износа. Поэтому время обкатки каждого из первых двух этапов может быть сокращено. Кроме того, на этапах при частоте вращения коленчатого вала 1900 и 2000 мин⁻¹ износ практически не наблюдается (см. кривые 3 на рисунке 1 и 2). Это обусловлено тем, что на таких частотах вращения коленчатого вала инерционные нагрузки в значительной степени уравниваются силами давления газов.

Равномерность износа при режиме обкатки по таблице 3 подтверждается также близкой к линейной зависимостью температуры масла от времени обкатки, тогда как для режима по таблице 1 этого не наблюдается (см. кривые 1 и 3 на рисунке 3).

Динамика износа при промежуточном режиме (см. табл. 3) иллюстрирована кривыми 2 на рисунках 1 и 2. Относительные износы по стадиям приработки распределились следующим образом:

- для двигателя ЯМЗ-236 – холодная обкатка – 70, на холостом ходу – 9, горячая под нагрузкой – 21 %;
- для двигателя ЯМЗ-238 – холодная обкатка – 62, на холостом ходу – 18, горячая под нагрузкой – 20 %.

В режиме обкатки по таблице 1 эти величины были соответственно равны 28, 10, 62 %, и 31, 6, 63 %. В промежуточном режиме соответственно для двигателя ЯМЗ-236 – 64, 9, 27 % и для ЯМЗ-238 – 63, 13, 24 %.

Продолжительность режима обкатки по таблице 3 меньше продолжительности по таблице 1 на 48 % и составляет 95 мин. Сравнение кривых 1 и 2 (см. рис. 1 и 2) позволяет отметить, что динамика изменения износов при данном варианте приработки более благоприятная, чем по таблице 1, поскольку в ней практически отсутствуют зоны длительной стабилизации интенсивности износа (горизонтальные участки на кривых 1, 2) и обеспечивается плавное и, главное, равномерное нарастание износов.

Максимальная интенсивность изнашивания происходит в период холодной приработки – 2,4 и 2,6 г/т·мин. Более повышенные износы в этот момент опасны усилением абразивного воздействия частиц износа и образованием значительных участков адгезионного взаимодействия (микроконтактного схватывания).

Динамика износа заключительного периода приработки ($n = 1900, 2000 \text{ мин}^{-1}$) характеризуется относительными значениями для двигателя ЯМЗ-236 – 2 и 1 %, а для двигателя ЯМЗ-238 – 4 и 2 %.

Для сравнения, по режиму таблицы 1 эти значения составляют 4 и 8 % (ЯМЗ-236), 6 и 15 % (ЯМЗ-238), соответственно.

Уменьшение износов на заключительных этапах обкатки под нагрузкой при режиме по таблице 3 по сравнению с таблицей 1 свидетельствует о более благоприятном характере формирования несущих поверхностей и улучшении качества приработки.

Момент окончания стендовой обкатки двигателей оценивался также по изменению значения мощности механических потерь. На протяжении всего процесса наблюдается ее снижение в зависимости от

времени обкатки, а на заключительных этапах – асимптотическое приближение к оси абсцисс по закону, близкому к экспоненте (рис. 4).

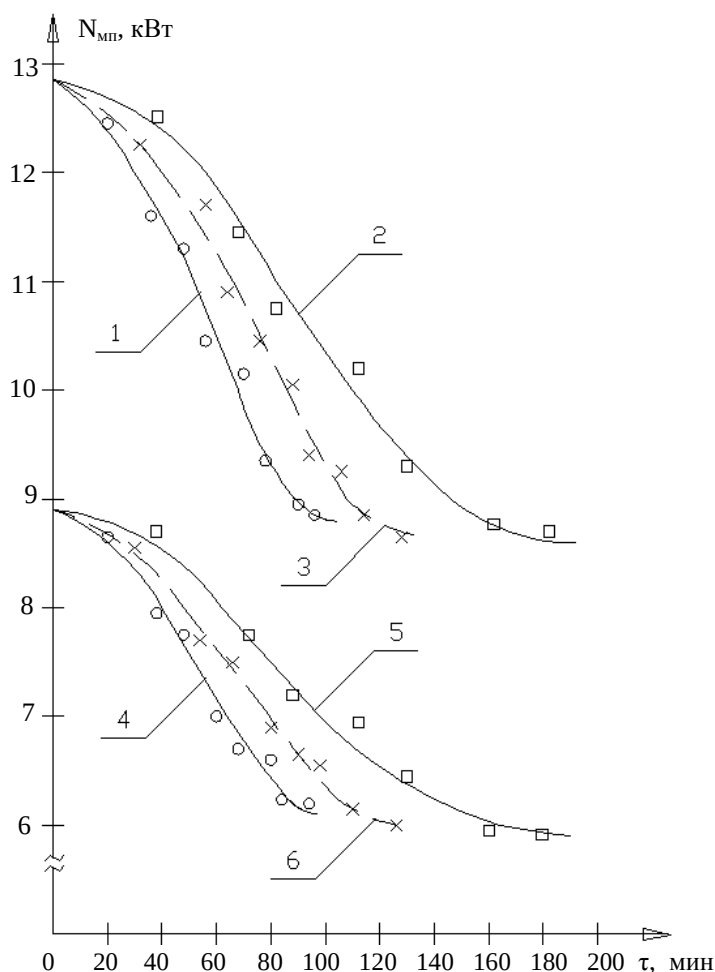


Рис. 4. Зависимость мощности механических потерь от времени обкатки

1, 4 – режим обкатки по таблице 3; 2, 5 – режим обкатки по таблице 1;
3, 6 – режим обкатки по таблице 2; 1, 2, 3 – двигатель ЯМЗ-238; 4, 5, 6 – двигатель ЯМЗ-236

От режима приработки существенно зависит и интенсивность снижения мощности механических потерь. Например, на стадии холодной обкатки по таблице 1 скорость изменения мощности механических потерь минимальна и составляет $1,7 \cdot 10^{-2}$ (ЯМЗ-236) и $1,9 \cdot 10^{-2}$ (ЯМЗ-238) кВт/мин, а ее максимальные значения – $2,5 \cdot 10^{-2}$ и $4,0 \cdot 10^{-2}$ кВт/мин соответственно отмечаются на первом этапе горячей обкатки под нагрузкой ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$) при тормозной мощности 44 (ЯМЗ-236) и 60 (ЯМЗ-238) кВт. Анализ этих численных значений показывает, что на первом этапе горячей обкатки под нагрузкой интенсивность снижения выше, чем на стадии холодной в 1,5 раза для двигателей ЯМЗ-236 и в 2,1 раза – ЯМЗ-238.

При обкатке двигателей по режиму по таблице 3 интенсивность снижения мощности механических потерь относительно режима по таблице 1 на стадии холодной обкатки увеличивается для двигателя ЯМЗ-236 в 1,7, а на этапе горячей под нагрузкой ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$) в 1,4 раза и в 1,8 и в 1,4 раза для ЯМЗ-238 соответственно.

Наблюдается снижение общего суммарного износа в процессе приработки по сокращенному режиму на 7 % для двигателя ЯМЗ-236 и 6 % для ЯМЗ-238, а по промежуточному – на 4 и 3 % соответственно относительно режима по таблице 1.

Сопоставление динамики изменения мощности механических потерь с кривыми износа (см. рис. 1 и 2), полученными в результате спектрального анализа обнаруживает их допустимую сходимость и однозначность описания процесса приработки, это согласуется с данными [5].

Мощность механических потерь за весь цикл стеновой обкатки при режиме по таблице 1 обкатки снизилась, в среднем, на 3,0 и 4,3 кВт для двигателей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 соответственно. При сокращенном варианте обкатки по таблице 3 эти показатели составили 2,8 для двигателя ЯМЗ-236 и 4,0 кВт – ЯМЗ-238.

При обкатке по промежуточному режиму продолжительностью 125 мин (см. табл. 2) мощность механических потерь после обкатки снизилась на 2,9 и 4,1 кВт соответственно (см. кривые 3 и 6 на рисунке 4).

Снижение мощности механических потерь от начального значения в результате стендовой обкатки составляет:

режим по таблице 1:

- для двигателя ЯМЗ-236 – 33,7 %, для двигателя ЯМЗ-238 – 33,5 %;

- сокращенный режим по таблице 3:

- для двигателя ЯМЗ-236 – 31,5 %, для двигателя ЯМЗ-238 – 31,1 %;

промежуточный режим по таблице 2:

- для двигателя ЯМЗ-236 – 32,6 %, для двигателя ЯМЗ-238 – 31,9 %.

Сокращенный вариант обкатки по таблице 3 рекомендуется предприятиям с высоким качеством ремонта, промежуточный вариант – тем, где уровень производства ниже, а режим обкатки по таблице 1 – предприятиям с низкой технологической обеспеченностью и культурой производства.

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- динамика изменения износов при режимах обкатки по таблице 3 более благоприятная, чем по таблице 1, поскольку в ней практически отсутствуют зоны длительной стабилизации интенсивности изнашивания и обеспечивается плавное и, главное, непрерывное нарастание износов;

- сопоставление динамики изменения мощности механических потерь с кривыми износа, полученными в результате спектрального анализа, обнаруживает их допустимую сходимость и однозначность описания процесса приработки, это согласуется с данными [5];

- равномерность износа при режиме обкатки по таблице 3 подтверждается также близкой к линейной зависимостью температуры масла от времени обкатки, тогда как для режима по таблице 1 этого не наблюдается;

- наиболее рациональным режимом для обкатки двигателей является режим по таблице 3, он применим на предприятиях с высоким качеством ремонта, промежуточный вариант – на тех, где уровень производства ниже, а режим обкатки по таблице 1 на предприятиях с низким уровнем технологической обеспеченности и культуры производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прищепов, М.А. Стендовая обкатка автотракторных дизелей с заданием ее режимов по мощности механических потерь / М.А. Прищепов, В.Г. Андруш // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. Аграр. навук. – 2012. – № 2. – С. 105–110.
2. Коваленко, Н.А. Техническая эксплуатация автомобилей / Н.А. Коваленко, В.П. Лобах, Н.В. Вепринцев. – Минск: Новое знание, 2008. – 352 с.
3. РК 200-РСФСР-2/1-2018-88. Двигатели ЯМЗ мод. 236, 238, 240 и их модификации: Руководство по капитальному ремонту 236.00.000 РК Ч.П. Сборка, регулировка и испытания. – М., 1989.
4. РК РБ 000 17590. 444-95. Двигатели ЯМЗ-236, 238, 240 и их модификации. Руководство по капитальному ремонту. Ч. 2. – Минск: БелНИИТТранстехника, 1995. – С. 198 – 203.
5. Храмцов, Н.В. Обкатка и испытание автотракторных двигателей / Н.В. Храмцов, А.Е. Королев, В.С. Малаев. – М.: Агропромиздат, 1991. – 125 с.

Поступила 08.07.2014

RATIONAL REGIME SELECTION OF THE RENOVATED ENGINES RUNNING

V. ANDRUSH

The investigations of Metal running repaired diesel JAMZ-236, JAMZ-238 in various modes. The magnitude and intensity of wear tried to modify the content of iron in the break-in oil, to control the dynamics of change in capacity of mechanical losses and oil temperature during a run. According to test results selected rational mode running.

УДК 656.13.05

**АУДИТ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
НА МАГИСТРАЛЬНОЙ УЛИЦЕ КРУПНОГО ГОРОДА****д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ***(Полоцкий государственный университет);***Д.В. МОЗОЛЕВСКИЙ, В.Н. КУЗЬМЕНКО, А.С. ПОЛХОВСКАЯ,****Н.В. АРТЮШЕВСКАЯ, Н.С. ЕРМАКОВА***(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Приведены результаты аудита организации дорожного движения на магистральной улице районного значения крупнейшего города, позволившего выявить недостатки и разработать соответствующие мероприятия по повышению безопасности дорожного движения. На основе проведенных исследований условий и характеристик дорожного движения выполнено обоснование проектных решений по повышению качества дорожного движения на улицах Минска. Приведены практические рекомендации по улучшению условий движения и повышению качества дорожного движения в целом на исследуемых объектах, прилегающих к зоне исследуемого участка улично-дорожной сети. Предложения повышают как безопасность пешеходов, так и транспортных потоков за счет выделения (специализации) полос движения для левоповоротных транспортных потоков, снижения числа невынужденных перестроений автомобилей, улучшения условий конфликтного взаимодействия левоповоротных автомобилей между собой, упорядочивания движения транспортных и пешеходных потоков, предоставления соответствующей своевременной информации водителям.

Введение. Дорожное движение – сложный технико-социальный процесс, в котором участвует все население любой страны, и оно должно быть организовано таким образом, чтобы издержки движения были минимальны, а комфортность и безопасность участников движения – максимальны.

По заданию Управления ГАИ ГУВД Мингорисполкома для исследования была выбрана улица Захарова, на которой средняя скорость движения транспортного потока не превышает 36 км/ч и наблюдается повышенный уровень экологических и аварийных (аварии с пострадавшими) издержек. Чтобы снизить уровень суммарных потерь в дорожном движении и повысить его качество, научно-исследовательский центр дорожного движения (НИЦ ДД) БНТУ провел экспериментально-расчетные исследования и разработал проектные решения по совершенствованию организации дорожного движения на исследуемом участке улицы.

Методология аудита. Методологические принципы связаны с повышением качества дорожного движения (в первую очередь его безопасности) [1]: максимизация опасности при выборе объекта исследования; минимизация суммарных потерь при оценке качества и выборе решений; сбалансированный учет аварийных и экологических потерь при выборе решений в неясных ситуациях; минимизация суммарной народнохозяйственной стоимости функционирования объекта при выборе мероприятий; обязательная оперативная контрольная оценка аварийной эффективности в процессе внедрения мероприятий. Необходимые исходные данные можно разделить на четыре группы [2]: геометрические характеристики; светофорное регулирование и обустройство; дорожные условия; транспортно-пешеходная нагрузка (параметры распределения скоростей движения транспортных потоков на регулируемом перекрестке, необходимые для стандартных расчетов экологических потерь: математическое ожидание $\bar{v}$, м/с; среднее квадратическое отклонение σ_v , м/с; коэффициент вариации распределения скорости I_v ; среднее квадратическое отклонение распределения ускорений σ_a , м/с²; градиент скорости G_v , 1/с; коэффициент изменения расхода топлива от неравномерности скорости $k_{np.c} = 1 + 0,3(20G_v + I_v)$ – рекомендуется определять расчетным путем с учетом удельных остановок и задержек транспорта на всех трех стоп-линиях.

Методология очагового анализа аварийности включает следующие этапы:

- предварительное установление причин на основе анализа дислокации аварий с использованием разработанного перечня типовых причин и сопутствующих обстоятельств, относящихся в основном к организации движения;
- натурное обследование очага по разработанным инструкциям для всех типовых городских очагов аварийности с использованием специальных бланков аудита;
- заключительное установление причин аварий по результатам натурного обследования. В случае затруднений с установлением причин аварий проводится повторное натурное обследование с участием транспортников, психологов и других специалистов;
- предварительный выбор решений по повышению безопасности движения, исходя из условия непревышения существующих суммарных потерь в очаге (выполняется с использованием разработанного специального перечня типовых решений, для каждого из которых указана предварительная аварийная, экологическая и экономическая эффективность).

Основная часть

Краткая характеристика объекта исследований. Улица Захарова является магистральной улицей районного значения (категория Б по [2]). На улице Захарова расположены: районы жилой застройки; учреждения образования (УО «Минский государственный лингвистический университет», УО «Минский государственный архитектурно-строительный колледж»); социально-бытовые объекты (Посольство Германии, магазины, кафе и др.). Улица Захарова обеспечивает транспортную связь между улицами Первомайской, Фрунзе, 3. Бядули и проспектом Независимости. На исследуемой улице располагаются пешеходные переходы через ул. Захарова на перекрестках ул. Захарова – пер. Броневой и ул. Захарова – пер. Войсковой (рис. 1 и 2). Нерегулируемые пешеходные переходы на пересечении расположены на участке улицы с двухсторонним движением с четырьмя полосами движения. Ширина проезжей части улицы Захарова в местах размещения пешеходных переходов составляет 12 м. Ширина полос составляет 3 м. Пешеходные переходы обозначены разметкой 1.14.1 и знаками 5.16.2(1). Ширина пешеходных переходов – 4 м. Тротуары отделены от проезжей части газоном. Состояние тротуаров и проезжей части хорошее. Технические средства организации дорожного движения (ТСОДД) находятся в хорошем состоянии.

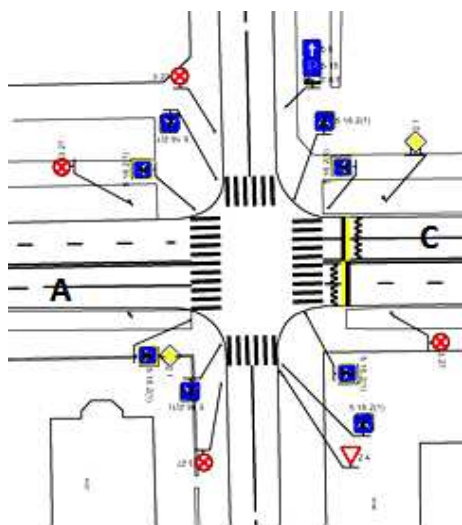


Рис. 1. План перекрестка ул. Захарова – пер. Броневой

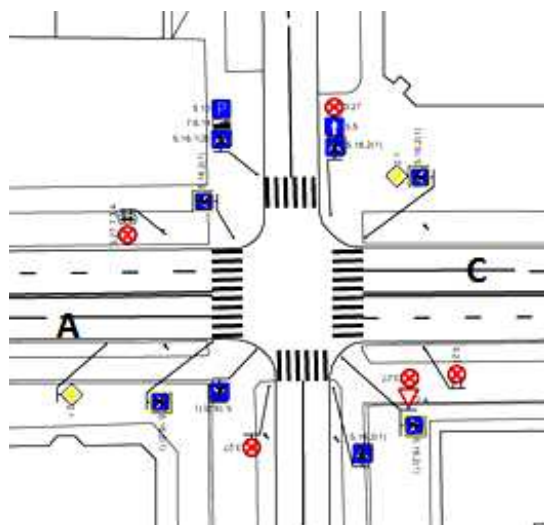


Рис. 2. План перекрестка ул. Захарова – пер. Войсковой

Сущность проводимого аудита состоит в следующем:

- на основе топографического анализа аварийности выбирается объект исследования [2] – самый опасный (принцип максимизации опасности);
- проводится детальное расчетно-экспериментальное обследование объекта с целью определения существующих потерь, выявления конкретных причин аварий (принцип достоверности и достаточности информации);
- на основе мирового опыта предварительно выбирается несколько решений по устранению причин аварий;
- выполняется их оценка и оптимизация (по критерию минимизации суммарных потерь);
- выбор наилучших решений и передача их исполнителю (существующий принцип минимизации суммарных потерь и новый – сбалансированного учета аварийных и экологических потерь);
- исполнитель с учетом своих возможностей на основе полученных решений разрабатывает и оптимизирует мероприятия (по критерию минимизации стоимости функционирования объекта, включающей приведенные капитальные вложения, расходы на эксплуатацию и суммарные потери в дорожном движении), выбирает наилучшее для внедрения.

Согласно принципу максимизации опасности при выборе объекта первоочередному исследованию с целью повышения безопасности дорожного движения подлежит очаг аварийности с наибольшей опасностью. Это вызвано тем, что в реальных условиях кадровые и иные возможности повышения безопасности дорожного движения весьма ограничены и прилагаемые усилия должны иметь наибольшую эффективность. Опасность очага аварийности, как правило, определяется по абсолютному показателю – числу аварий. При этом может использоваться социально-экономически приведенное число аварий (по тяжести последствий) или модифицированное социально-экономически приведенное число аварий, уменьшающие вероятность грубых ошибок при малом числе аварий в очаге, поскольку, например, одна, возможно случайная, авария со смертельным исходом при социально-экономическом расчете превышает несколько

десятков аварий с материальным ущербом без пострадавших. В некоторых случаях, особенно на высоконагруженных объектах, где одна авария может парализовать работу двух магистралей, опасность согласно Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь подсчитывается как сумма всех видов потерь. Принцип минимизации суммарных потерь при оценке качества и выборе решений определяется так: чем меньше суммарные потери, тем лучше решение. Потери – это социально-экономическая стоимость невынужденных издержек процесса движения (аварии, задержки, остановки и перепробег транспорта, перерасход топлива, излишние выбросы вредных веществ и транспортный шум, нарушения законности и др.) [2]. Потери являются оценочным критерием качества дорожного движения. Принцип минимизации народно-хозяйственной стоимости функционирования объекта при выборе мероприятий состоит в том, что чем меньше народно-хозяйственная стоимость функционирования объекта, тем лучше мероприятие.

Суммарные потери на исследуемом объекте являются лишь частью народно-хозяйственной стоимости его функционирования. Кроме суммарных потерь в эту стоимость входят приведенные капитальные вложения на реализацию выбранного мероприятия и текущие расходы на эксплуатацию объекта. Поскольку на уже существующих объектах приведенная стоимость их строительства является величиной постоянной для любых вариантов мероприятий, то она не учитывается и в выборе мероприятий не участвует [2].

Стоимость капитальных вложений и расходов на эксплуатацию объекта зависит от многих производственных факторов у конкретных исполнителей и при выборе наилучших решений. Разработчик передает исполнителю набор наилучших решений, для каждого из которых известны суммарные потери и их составляющие, в том числе и по аварийности. Имея этот набор и учитывая свои возможности, исполнитель выбирает, разрабатывает и внедряет мероприятие.

При этом в процессе внедрения мероприятия (ближе к его окончанию) проводится обязательная оперативная контрольная оценка эффективности внедряемого мероприятия (новые принципы минимизации стоимости функционирования объекта и оперативной контрольной оценки эффективности внедряемого мероприятия). Приведенные принципы и методы повышения безопасности позволяют выбрать наилучшее (оптимальное) решение в каждом конкретном случае [3].

Проведение исследований и их результаты. Исследования включали в себя измерение интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков, скорости движения, условий видимости и т.д., а также расчет существующих потерь в дорожном движении при имеющихся характеристиках потоков и условий движения. Измерение транспортно-пешеходной нагрузки производилось по методике НИЦ ДД БНТУ и обрабатывалось в программном комплексе «RTF – Road traffic flows» [4].

Измерения разделялись на отдельные независимые замеры по входам и по направлениям. Каждому входу на пересечении присваивался индекс по часовой стрелке (А, В, С, D). По результатам строились графики неравномерности движения, диаграммы состава транспортного потока и картограммы интенсивности движения (рис. 2–7, фрагментарно).

ул. Захарова - пер. Броневой (А - со стороны пр-та Независимости)

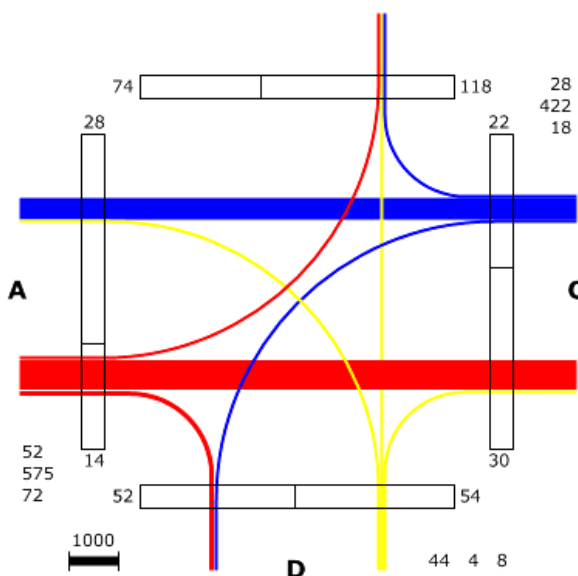


Рис. 2. Картограмма средней суммарной интенсивности движения (А – со стороны проспекта Независимости)

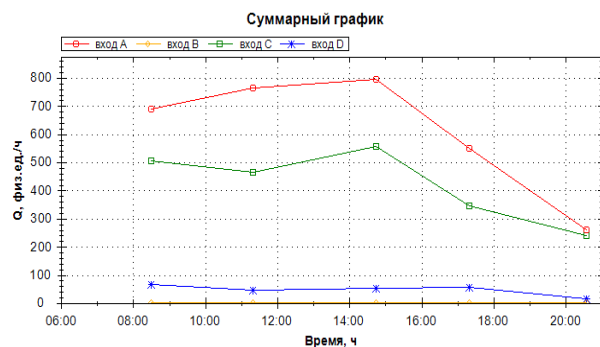


Рис. 3. Суточная неравномерность интенсивности движения транспорта по входам

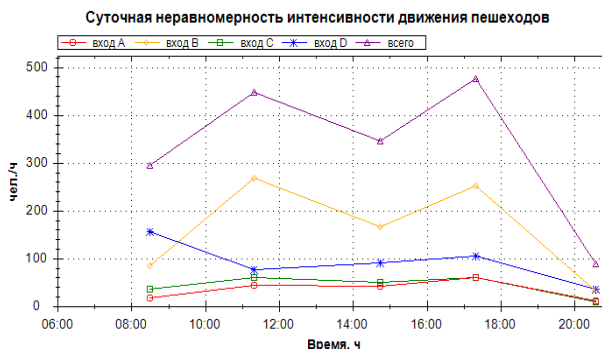


Рис. 4. Суточная неравномерность интенсивности движения пешеходов

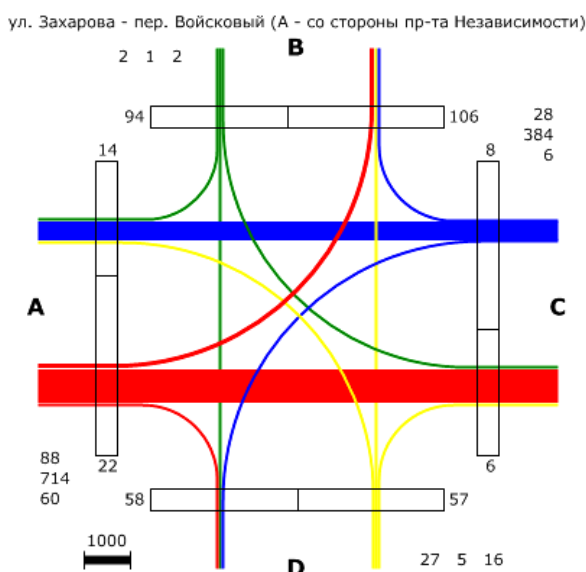


Рис. 5. Картограмма средней суммарной интенсивности движения
(A – со стороны проспекта Независимости)

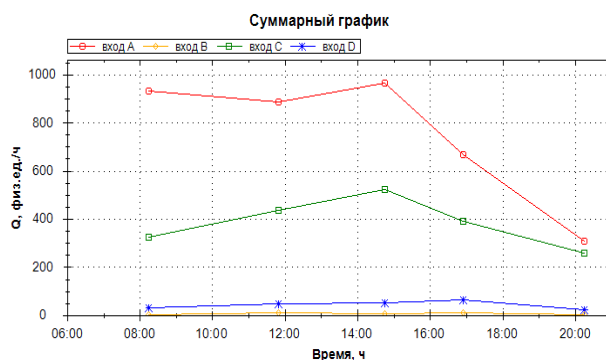


Рис. 6. Суточная неравномерность интенсивности движения транспорта по входам

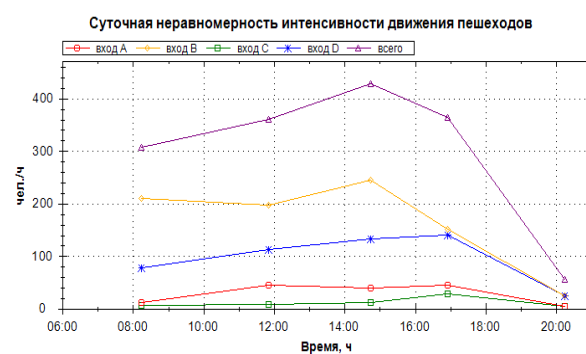


Рис. 7. Суточная неравномерность интенсивности движения пешеходов

Мероприятия по повышению безопасности дорожного движения. На исследуемых пешеходных переходах не выполняется ни одно из условий введения светофорного регулирования согласно СТБ 1300-2007. С целью повышения безопасности дорожного движения, снижения уровня аварийности, создания более благоприятных условий для перехода пешеходами проезжей части ул. Захарова на исследуемых нерегулируемых переходах необходимо устройство конструктивно выделенных островков безопасности и приподнятых пешеходных переходов [5].

По результатам проведенных исследований даны рекомендации по усовершенствованию и упорядочиванию движения на исследуемом участке улицы. На основании изложенного, при разработке проектного решения рассматривались различные варианты организации дорожного движения. В «Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь» [6], указано, что дорожное движение содержит не одну, а четыре основные угрозы – аварийную, экологическую, социальную и экономическую. Поэтому оптимизация принимаемых решений по повышению безопасности движения производилась на основе учета всех видов потерь в дорожном движении. Оптимизация проводилась по методикам НИЦ ДД БНТУ [7] по критерию минимизации суммарных потерь в дорожном движении.

Для правильной работы объектов необходимо учесть следующие мероприятия: демонтировать существующую искусственную неровность; демонтировать пешеходный переход через ул. Захарова со стороны просп. Независимости; устроить конструктивно выделенные островки безопасности; устроить приподнятые пешеходные переходы; демаркировать существующую и нанести новую дорожную разметку на подходах к пешеходным переходам и на них самих; демонтаж существующих дорожных знаков и установка проектируемых дорожных знаков в соответствии с СТБ 1300-2007 (с обеспечением их наилучшей видимости).

На рисунках 8 и 9 представлены наилучшие варианты, согласованные в установленном порядке Управлением ГАИ ГУВД Мингорисполкома и всеми заинтересованными организациями. Предлагаемые мероприятия способствуют понижению скорости движения транспортных средств и ее поддержанию в рамках установленного ограничения на исследуемом участке улицы (не выше 50 км/ч).

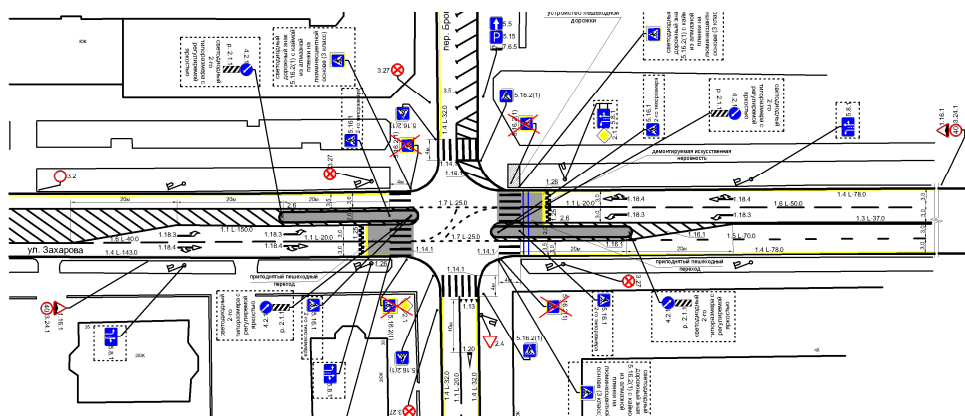


Рис. 8. Вариант организации дорожного движения на перекрестке ул. Захарова – пер. Броневой

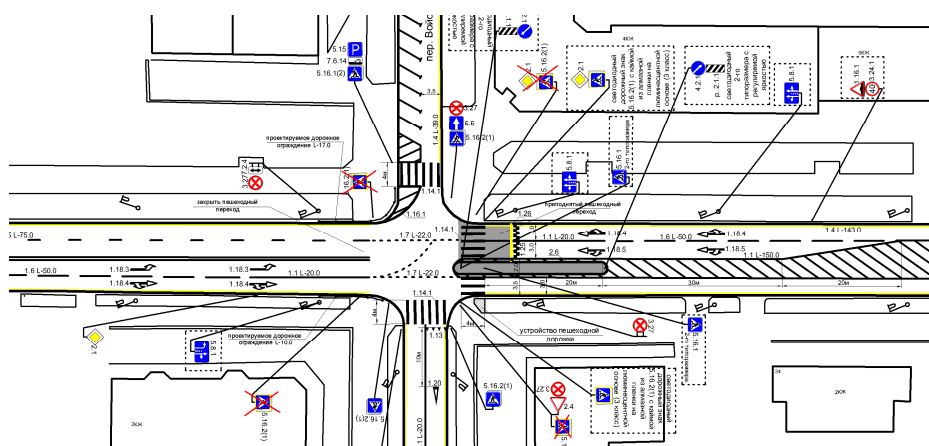


Рис. 9. Согласованный вариант организации дорожного движения на перекрестке ул. Захарова – пер. Войсковой

Заключение. На основе проведенных исследований условий и характеристик дорожного движения выполнено обоснование проектных решений по повышению качества дорожного движения на ул. Захарова в городе Минске. Предложения повышают не только безопасность пешеходов, но и транспортных пото-

ков за счет выделения (специализации) полос движения для левоповоротных транспортных потоков, снижения числа невынужденных перестроений автомобилей, улучшения условий конфликтного взаимодействия левоповоротных автомобилей. В последующем, при возрастании транспортной нагрузки, на данных объектах упрощается введение светофорного регулирования и обустройство объектов ТСОДД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении: моногр. / Д.В. Капский. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
2. Капский, Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: в 2-х т. / Д.В. Капский. – Минск: БНТУ, 2013. – Т. 1. – 282 с.
3. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования – Вуліцы населеных пунктаў. Будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-3.03-227-2010 (02250). – Введ. 01.07.2011. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2011. – 46 с.
4. Свидетельство № 222 от 17.09.10 о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, М.К. Мирошник, А.В. Коржова; В.Н. Кузьменко; А.С. Полховская; Е.Н. Костюкович.
5. Врубель, Ю.А. Водителю о дорожном движении: пособие для слушателей учебного центра подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров автотракторного факультета / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – 3-е изд., дораб. – Минск: БНТУ, 2010. – 139 с.
6. 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.
7. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении: моногр. / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.

Поступила 03.02.2014

**TRAFFIC MANAGEMENT, ROAD ACCIDENTS, AUDIT,
ANALYSIS OF ROAD TRAFFIC IMPROVEMENTS, SUGGESTIONS FOR ROAD IMPROVEMENT**

**V. IVANOV, D. MOZOLEVSKY, V. KUZMENKO,
A. POLKHOVSKY'S, N. ARTYSHEVSKAYA, N. ERMAKOVA**

The article presents the results of the audit organization of road traffic on the main street of district significance, possible to identify shortfalls and to develop appropriate measures. Based on these studies the conditions and characteristics of the traffic is justified design decisions to improve the quality of traffic on the street in Minsk. Practical recommendations for improving traffic conditions and improve the quality of road traffic in general on the test objects. Offers not only improve the safety of pedestrians, but traffic flows through the allocation (specialization) left turn lanes for traffic flows, reducing the number of unforced rebuilding cars, improve the conditions of conflict interaction left turn vehicles.

УДК 656.13.05:656.13.08

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ
В ЗОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Д.В. МОЗОЛЕВСКИЙ, В.Н. КУЗЬМЕНКО, А.С. ПОЛХОВСКАЯ,
Н.В. АРТЮШЕВСКАЯ, Н.С. ЕРМАКОВА**
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приведены результаты выбора и обоснования проектного решения, разработанного на основании выполненных расчетно-экспериментальных исследований условий движения и параметров транспортно-пешеходных потоков и оптимизированного по критерию минимизации суммарных потерь в дорожном движении. На основе проведенных исследований условий и характеристик дорожного движения выполнено обоснование проектного решения по повышению качества дорожного движения в зоне исследуемого объекта. Предложения упорядочивают движение транспортных потоков (в том числе повышает безопасность движения пешеходов). Разработана альтернативная конструкция приподнятого пешеходного перехода. Обосновано планировочное исполнение транспортного объекта и зоны приближения к нему. Предлагаемые мероприятия обеспечивают снижение скорости движения транспортных средств и ее поддержанию в рамках установленного ограничения на исследуемом участке (не более 50 км/ч). Разработана схема организации дорожного движения на исследуемом объекте.

Выведение. Движение должно быть организовано таким образом, чтобы любой его участник, выполняя предъявляемые к нему требования, имел достаточные гарантии безопасности [1]. Особую актуальность в этом плане приобретают права пешеходов на безопасный переход проезжей части, которые в настоящее время часто игнорируются и, практически, должным образом не реализуются. Особенно остро эта проблема очевидна для транспортных и пешеходных потоков в зоне размещения дополнительных торговых объектов. В рассматриваемом случае «каплей», переполнившей чашу, является новый торговый центр. Для того чтобы повысить качество дорожного движения, научно-исследовательский центр дорожного движения (НИЦ ДД) БНТУ провел экспериментально-расчетные исследования и разработал проектные решения, направленные на совершенствование условий дорожного движения. Исследуемый участок улицы Уборевича расположен в Заводском районе города Минска на участке между улицами Клецкой и Голодеда. Улица Уборевича является магистральной улицей районного значения (категория Б по [2]) (рис. 1). Через исследуемый участок проходят маршруты автобусов № 16, 21, 88С, 98С, 102, 108, 148С. Основные пешеходные потоки формируются близлежащей жилой застройкой, остановочными пунктами, социально-бытовыми объектами (10 городская клиническая больница, средняя школа № 131, детский сад № 344, детский дом № 6, магазин «Фрукты») и др. Планируется дополнительное разрешение объекта торговли и пункт общественного питания (кафе).



Рис. 1. План исследуемого участка улицы Уборевича

Цель работы – повышение качества дорожного движения на соподчинённой улично-дорожной сети на основе оценки и прогнозирования уровня основных издержек в дорожном движении путем применения эффективных мероприятий по организации дорожного движения и транспортной планировки объекта.

Методология и результаты исследований. Исследования включали в себя измерение интенсивности движения транспортных и пешеходных потоков на ул. Уборевича в зоне проектируемого объекта, скорости движения на подъезде к пешеходному переходу, условий видимости, а также расчет существующих потерь в дорожном движении при имеющихся характеристиках потоков и условиях движения.

Сущность методологии принятия решений [7] заключается в том, что любое решение или мероприятие по повышению безопасности движения должно быть оптимизировано. Методология включает: выбор объекта исследования – желательно, чтобы он был самым опасным и самым «тяжелым»; детальное расчетно-экспериментальное исследование объекта с целью оценки существующих потерь и установления конкретных причин аварий; на основе мирового опыта предварительно выбирается несколько решений по устранению причин аварий, выполнение их оптимизации (по критерию минимизации суммарных потерь в дорожном движении) и отбираются лучшие из них. Лучшие решения передаются исполнителю, который с учетом своих возможностей разрабатывает и оптимизирует (по критерию минимизации стоимости функционирования объекта, включающей приведенные капитальные вложения, расходы на эксплуатацию и суммарные потери в дорожном движении). При этом в процессе внедрения мероприятия производится оперативная контрольная оценка его эффективности.

Общая часть. Интенсивность и состав транспортных потоков определялись в рабочие дни недели путем натурного эксперимента по методике БНТУ. Измерения разделялись на отдельные независимые замеры по входам и направлениям. Каждому входу на пересечении присваивался индекс по часовой стрелке (А, В, С, D). Входы главной дороги обозначались как А и С. Для одного из входов указывался ориентир. Длительность одного замера, как правило, составляла не менее 15 минут. Замеры проводились с 8 до 20 часов. Замер – регистрация в заданном сечении автомобилей при помощи специальных символов за определенный промежуток времени. Состав транспортного потока разбивали на шесть групп, которые были обозначены символами: Л (мотоциклы, легковые автомобили, пассажирские микроавтобусы); Г (грузовые микроавтобусы, грузовые автомобили средней грузоподъемности); Р (грузовые автомобили большой грузоподъемности); П (автопоезда, тракторные поезда); О (маршрутные автобусы); А (немаршрутные автобусы).

В программном комплексе «RTF-Road traffic flows»[3] затем были обработаны исходные данные, в результате чего получены картограммы интенсивности и неравномерности движения транспортных и пешеходных потоков, диаграммы состава транспортного потока и таблицы других параметров. Измерения проводились в будние дни. Результаты выходной информации в виде рисунков приведены на рисунке 2, фрагмент).

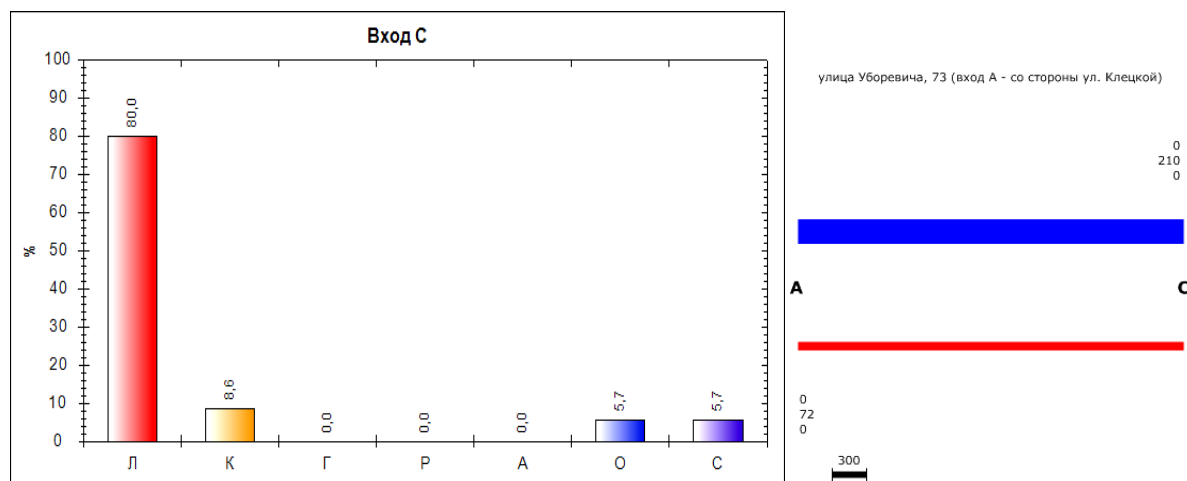


Рис. 2. Диаграмма состава транспортного потока на входе С и картограмма средней суммарно интенсивности движения в исследуемом сечении (фрагмент)

Треугольники боковой видимости определялись экспериментальным путем.

В соответствии с ТКП 45-3.03-227-2010 «Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования» треугольник видимости нормативный в конфликте «транспорт – пешеход» при максимальной разрешенной скорости, равной 60 км/ч, принят 50 м × 10 м.

Кроме размеров треугольника боковой видимости, также оценивалась его прозрачность: если автомобиль виден почти непрерывно (более 90 % времени), прозрачность треугольника боковой видимости отличная; если видимость составляет 70...90 % времени, прозрачность хорошая (имеются отдельные помехи, например: стойки дорожных знаков, опоры линии электропередач, отдельные нетолстые деревья); если 40...70 %, удовлетворительная (значительные помехи, включая отдельные припаркованные автомобили); менее 40 % – неудовлетворительная (очень сильные помехи, в том числе деревья, припаркованные грузовые автомобили и автобусы, с трудом или перерывами различается главный конфликтующий участник).

Треугольник боковой видимости оценивался для второй полосы как на входе А, так и на входе С, поскольку крайние полосы заняты припаркованными автомобилями.

При отсутствии припаркованных автомобилей треугольник боковой видимости в конфликте «транспорт – пешеход» соответствует нормативному, прозрачность фактического треугольника боковой видимости – хорошая. При наличии припаркованных автомобилей треугольник боковой видимости значительно уменьшается и не соответствует нормативному.

Исследование скорости движения транспортных потоков в зоне приближения к исследуемому пешеходному переходу проводилось по методике БНТУ.

Определялись параметры распределения скоростей, такие как математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации:

$$\bar{V} = \frac{\sum (V_i \cdot n_i)}{\sum n_i}, \text{ км/ч}; \sigma_V = \sqrt{\frac{\sum (V_i - \bar{V})^2 \cdot n_i}{\sum n_i}}, \text{ км/ч}; I_V = \frac{\sigma_V}{\bar{V}},$$

где n_i – число замеров, соответствующих данному значению скорости (или входящих в данную группу);

V_i – скорость данного замера (или средняя скорость данной группы), км/ч.

По результатам расчетов построены кривые распределения скоростей (рис. 3).

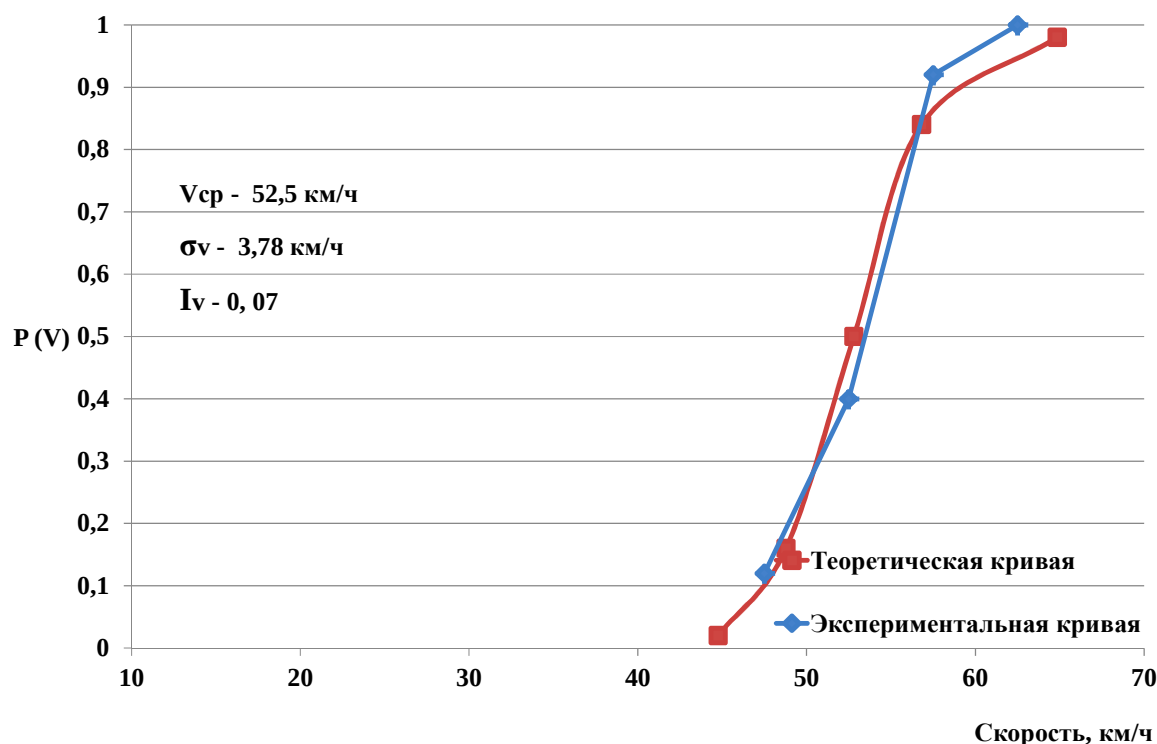


Рис. 3. Кумулятивные кривые распределения скоростей движения на подходе к исследуемому пешеходному переходу (вход А)

Измерения скорости движения проводились на подходе к нерегулируемому пешеходному переходу на каждом из входов. Измерения скорости движения проводились только на второй полосе входа А и входа С, поскольку на правых полосах припаркованы автомобили (пример – рисунок 3).

Треугольники боковой видимости определялись экспериментальным путем. В соответствии с ТКП 45-3.03-227-2010 «Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования» треугольник ви-

димости нормативный в конфликте транспорт-пешеход принят $40 \text{ м} \times 8 \text{ м}$, поскольку разрешенная максимальная скорость движения транспортных потоков по магистральной улице (в зоне пешеходного перехода) в зоне приближения к исследуемому объекту равна 40 км/ч (входы А и С).

Главными причинами повышенной аварийности на пешеходном переходе являются: недостаточная видимость, особенно боковая, недостаточная освещенность в темное время суток, недостаточное обустройство пешеходного перехода средствами организации дорожного движения, нечеткость приоритета и др.

Основными угрозами безопасности являются: наличие припаркованных автомобилей, ухудшающих треугольник боковой видимости в конфликте транспорт-пешеход на нерегулируемом пешеходном переходе; отсутствие островка безопасности на существующем пешеходном переходе; недостаточная видимость в темное время суток; нарушение Правил дорожного движения участниками и их дивиантное поведение.

В связи со строительством торгового центра появится новый объект тяготения транспортного и пешеходного движения, что приведет к увеличению интенсивности движения на пешеходном переходе.

По результатам проведенных исследований даны рекомендации по усовершенствованию и упорядочиванию движения на исследуемом участке за счет обустройства пешеходного перехода.



Рис. 4. Вариант организации дорожного движения и планировочных решений № 2

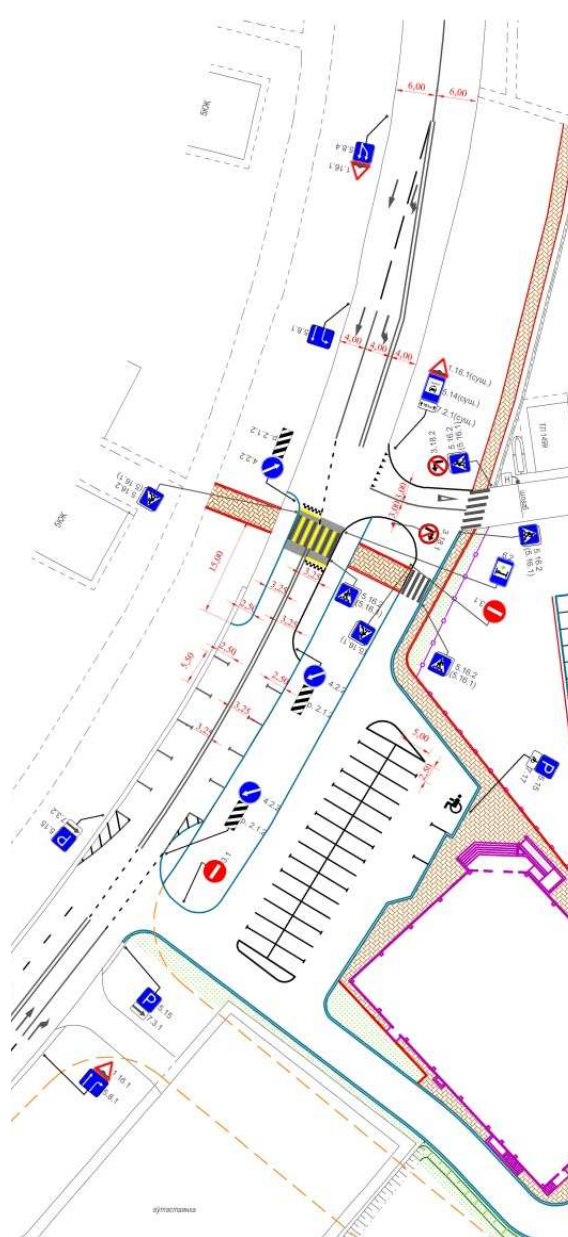


Рис. 5. Вариант организации дорожного движения и планировочных решений № 3

Для повышения безопасности дорожного движения, снижения аварийности, создания более благоприятных условий для перехода пешеходами проезжей части на исследуемом участке улицы Уборевича необходимо устройство конструктивно выделенного островка безопасности и приподнятого пешеходного перехода. Было предложено несколько вариантов планировочных решений на проектируемом пешеходном переходе, два из них представлены на рисунках 4 и 5.

Необходимо отметить, что изначально заказчиком было принято решение не устраивать светофор в связи с незначительной нагрузкой на исследуемом участке дорожной сети, а также ограниченными финансовыми возможностями по устройству светофорного регулирования.

На основании разработанной схемы организации дорожного движения, а также по результатам экспериментальных исследований на исследуемом объекте и с учетом возрастания транспортно-пешеходной нагрузки после открытия торгового центра был рассчитан прогнозируемый уровень загрузки и прогнозируемая пропускная способность после внедрения предлагаемых мероприятий. Крайние правые полосы использовались ранее для парковки автомобилей, поэтому движение по ним в прямом направлении не осуществлялось, поэтому дорога будет перепроектирована на некотором протяжении в двухполосную (в обоих направлениях) и движение будет осуществляться только по одной полосе.

На рисунке 6 представлена диаграмма прогнозируемого уровня загрузки при условии движения по одной полосе в каждом направлении.

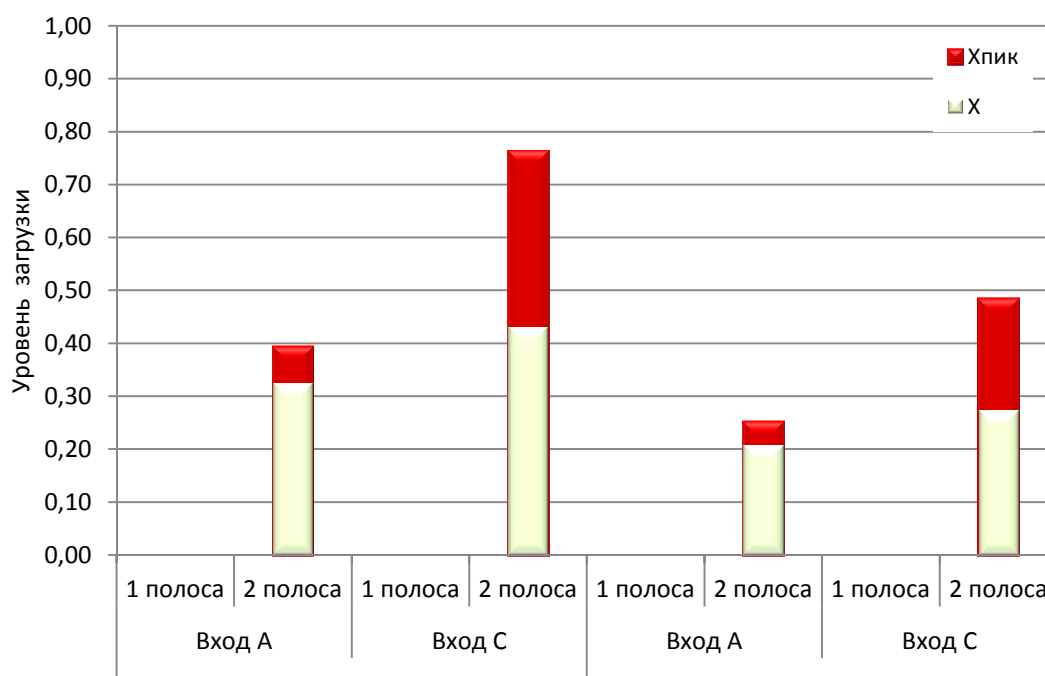


Рис. 6. Прогнозируемый уровень загрузки

На основании изложенного, при разработке проектного решения рассматривались различные варианты организации пешеходного движения через проезжую часть улицы Уборевича [4]. В «Концепции обеспечения безопасности дорожного движения в Республике Беларусь» [5], разработанной согласно Указу Президента Республики Беларусь № 551 от 28 ноября 2005 года и утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 14 июня 2006 г. № 757, указано, что дорожное движение содержит не одну, а четыре основные угрозы – аварийную, экологическую, социальную и экономическую. Поэтому повышение качества дорожного движения подразумевает снижение потерь во всех видах опасности, но никак не снижение потерь в одном виде за счет многократного их увеличения в других видах. В связи с этим оптимизация принимаемых решений по повышению безопасности движения производилась на основе учета всех видов потерь в дорожном движении и, как следствие, минимизации всех основных угроз – аварийной, экологической, экономической и социальной. Оптимизация проводилась по методикам [6] по критерию минимизации суммарных потерь в дорожном движении.

На рисунке 7 представлен наилучший вариант, согласованный в установленном порядке с Управлением ГАИ ГУВД Мингорисполкома и всеми заинтересованными организациями.

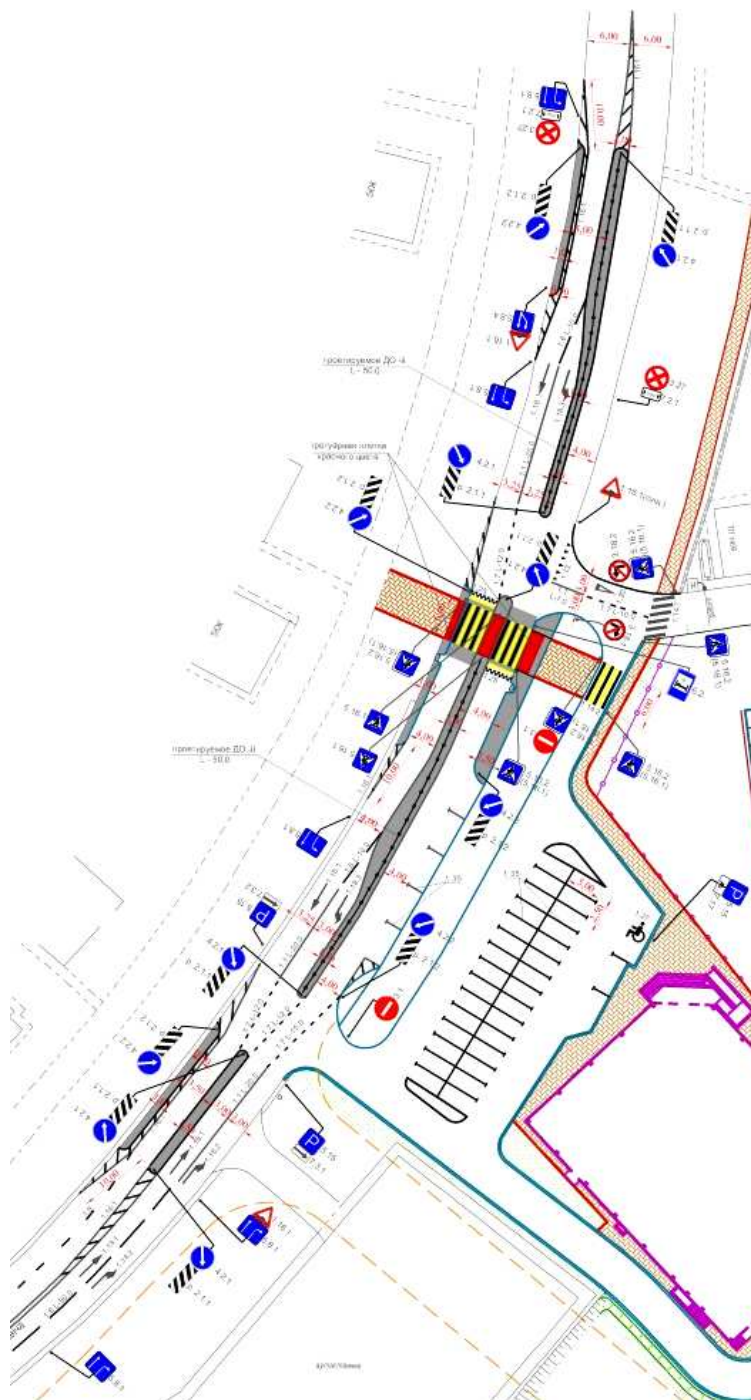


Рис. 7. Вариант организации дорожного движения на исследуемом участке улицы Уборевича

Наилучшим вариантом организации дорожного движения является устройство приподнятого пешеходного перехода и конструктивно выделенного островка безопасности, что позволит повысить безопасность движения пешеходов через улицу Уборевича и визуально выделить пешеходный переход на участке улицы.

Для правильного функционирования проектируемого нерегулируемого перехода необходимо учесть следующие мероприятия: устроить конструктивно выделенный островок безопасности; устроить приподнятый пешеходный переход; демаркировать существующую и нанести новую дорожную разметку на подходе к пешеходному переходу и на самом переходе; при устройстве пешеходного перехода необходимо предусмотреть понижение бортового камня (высота не более 0,025 м) в зоне выхода пешеходов с

тротуара на проезжую часть для движения по пешеходному переходу и в зоне выхода пешеходов с островка безопасности; демонтаж существующих дорожных знаков и установка проектируемых дорожных знаков в соответствии с СТБ 1300-2007 (с обеспечением их наилучшей видимости). Конструкция приподнятого пешеходного перехода приведена на рисунке 8.

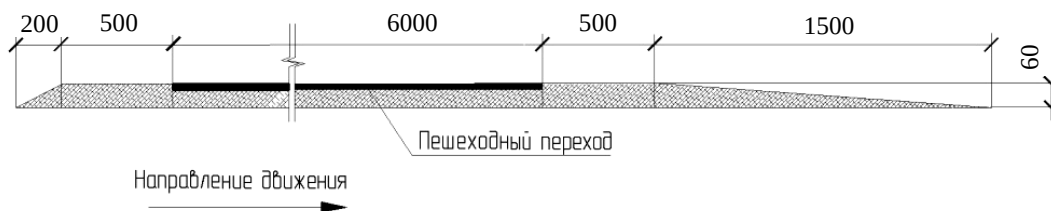


Рис. 8. Конструкция приподнятого пешеходного перехода

Выводы. На основе проведенных исследований условий и характеристик дорожного движения выполнено обоснование проектного решения по повышению качества дорожного движения в зоне исследуемого объекта. Данное решение упорядочивает движение транспортных потоков (в том числе за счет условий парковки автомобилей), повышает безопасность движения пешеходов. Предлагаемое решение является альтернативным решением ведению светофорного регулирования (с вызывным устройством), не уступает ему с точки зрения уровня прогнозируемых потерь в дорожном движении сопоставляемых вариантов. Предлагаемые мероприятия способствуют понижению скорости движения транспортных средств и ее поддержанию в рамках установленного ограничения на исследуемом участке (не более 50 км/ч).

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский, Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении: моногр. / Д.В. Капский. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с. + вкл.
2. Улицы населенных пунктов. Строительные нормы проектирования = Вуліцы населеных пунктаў. Будаўнічыя нормы праектавання: ТКП 45-3.03-227-2010 (02250). – Введ. 01.07.2011. – Минск: М-во архитектуры и строительства Респ. Беларусь, 2011. – 46 с.
3. Свидетельство № 222 от 17.09.10г. о регистрации компьютерных программ в Национальном центре интеллектуальной собственности / Д.В. Капский, Д.В. Мозалевский, М.К. Мирошник, А.В. Коржова; В.Н. Кузьменко; А.С. Полховская; Е.Н. Костюкович.
4. Врубель, Ю.А. Водителю о дорожном движении: пособие для слушателей учебного центра подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров автотракторного факультета / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский. – 3-е изд., дораб. – Минск: БНТУ, 2010. – 139 с.
5. 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.
6. Врубель, Ю.А. Определение потерь в дорожном движении: моногр. / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
7. Капский, Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: в 2-х т. / Д.В. Капский. – Минск, 2013. – Т. 1. – 282 с.

Поступила 03.02.2014

IMPROVING ROAD TRAFFIC MANAGEMENT WHEN PLACING AN OBJECT GRAVITY SHOPPING DESTINATION

D. MOZOLEVSKY, V. KUZMENKO, A. POLKHOVSKY'S,
N. ARTYSHEVSKAYA, N. ERMAKOVA

The article presents the results of a design solution, developed on the basis of performed calculations and experimental studies on road traffic conditions and optimized by minimizing the total loss in road traffic. Based on these studies the conditions and characteristics of the road traffic is justified project solutions to improve the quality of road traffic in the area of the object. Offers streamline traffic flows (increased safety for pedestrians). Developed alternative design elevated pedestrian crossing. Suggested activities provide reduced vehicle speed and maintain it within the established limits on the test site (not exceeding 50 km/h).

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 665.733.5

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ХИМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВ

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК; канд. хим. наук, доц. С.И. ХОРОШКО;
канд. пед. наук, доц. И.В. БУРАЯ
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены существующие методы и критерии оценки химической стабильности автомобильных бензинов. Показано, что в настоящее время наиболее объективным показателем, характеризующим химическую стабильность бензинов, является содержание в них фактических смол. Предложена методика оценки динамики накопления смол в бензине при его ускоренном окислении. Приведены результаты изучения свойств образцов бензина марки АИ-92-К5-ЕВРО и влияния продолжительности их окисления в условиях СТБ ИСО 7536 на изменение содержания в них смол. Показано, что предлагаемый метод обладает достаточно высокой чувствительностью и потенциально пригоден для оценки относительной химической стабильности автомобильных бензинов. Предложены возможные направления практического применения предлагаемой методики оценки динамики накопления смол в автомобильном бензине при его ускоренном окислении.

Введение. В настоящее время автомобильные бензины являются одним из наиболее крупнотоннажных продуктов нефтеперерабатывающей промышленности, используемых в качестве топлива для поршневых двигателей внутреннего сгорания с принудительным воспламенением топливно-воздушной смеси. Автомобильные бензины до использования иногда приходится транспортировать и хранить в течение длительного времени. В этот период наиболее нестабильные соединения, входящие в их состав, под воздействием кислорода воздуха претерпевают различные химические превращения. Эти реакции приводят к образованию гидроперекисей и продуктов их распада, представляющих собой как сравнительно стабильные вещества – спирты, альдегиды, карбоновые кислоты, так и высокоактивные радикалы, способствующие развитию цепных реакций и образованию смолистых веществ сложного состава. Способность бензинов противостоять химическим изменениям при хранении, транспортировании и применении называют химической стабильностью [1].

Способы оценки химической стабильности бензинов можно разделить на две группы: методы, характеризующие потенциальную склонность бензина к окислению, и методы, используемые для определения степени окисленности бензина на момент испытания. К первой группе относятся методы ускоренного окисления бензина под действием повышенной температуры в присутствии кислорода, выражаемые стойкостью к окислению (индукционным периодом окисления), суммой продуктов окисления (метод СПО) [2], количеством поглощенного кислорода, а также углеводородным составом с определением содержания наиболее химически нестабильных непредельных углеводородов. Вторая группа включает методы определения концентрации фактических смол и кислотности.

Наиболее распространенным в разных странах мира стандартным показателем стойкости бензина к окислению является индукционный период [1–3]. Процесс окисления бензина вначале идет очень медленно и лишь после определенного промежутка времени скорость его возрастает. Интервал времени, в течение которого скорость окисления очень мала и поглощения кислорода практически не наблюдается, называют индукционным периодом окисления. Чем больше длительность индукционного периода, тем выше стойкость бензина к окислению при хранении. Определение индукционного периода (стойкости к окислению) в условиях хранения бензина слишком длительный процесс, поэтому применяются лабораторные методы его определения в условиях ускоренного окисления. Ускорение окисления достигается за счет повышения температуры, обычно до 100 °С, а процесс проводится в специальной бомбе, где испытуемый образец бензина находится под давлением кислорода. Испытания проводятся по СТБ ИСО 7536 «Нефтепродукты. Определение окислительной стабильности. Метод индукционного периода» (ASTM D525, IP 40, DIN 51780, ISO 7536, ГОСТ Р ЕН ИСО 7536, ГОСТ 4039).

Однако величина индукционного периода бензина, определенного в ускоренных лабораторных условиях, не всегда позволяет достаточно точно предсказать химическую стабильность бензина в условиях хранения. Отмечены случаи, когда бензины с высоким индукционным периодом довольно быстро окислялись в условиях хранения и, наоборот, бензины с малым индукционным периодом хранились без изменения свойств в течение длительного времени. Известно, что стабильность бензина с антиокисли-

тельной присадкой при хранении всегда выше, чем бензина без присадки даже при одинаковом значении длительности индукционного периода окисления [1].

В работе [4] также было установлено, что между индукционным периодом и допустимыми сроками хранения бензина нет четкой зависимости. Исследования показали, что наиболее тесную взаимосвязь со сроком хранения имеет показатель, характеризующий накопление в бензине фактических смол. Следует отметить, что рост содержания фактических смол в бензине происходит независимо от индукционного периода окисления. В бензине с высоким индукционным периодом может происходить интенсивное накопление смол [1]. В связи с этим метод индукционного периода используют главным образом для оценки химической стабильности бензинов, содержащих значительное количество олефинов, склонных к быстрому окислению при хранении. Бензины, получаемые на базе компонентов каталитического риформинга и изомеризации, имеют высокую химическую стабильность, и их индукционный период достигает 25 часов и более. Поэтому при производстве таких бензинов на НПЗ фактическое значение индукционного периода не определяют, а продолжительность опыта ограничивают в пределах норм соответствующих стандартов, например, 360 минут (СТБ 1656, EN 228). Это обстоятельство явилось предпосылкой для разработки новых более информативных методов оценки химической стабильности бензинов.

В СССР был разработан метод оценки химической стабильности бензинов по количеству накапливающихся высокомолекулярных продуктов в бензине при его окислении в регламентированных условиях, получивший название «метод СПО (сумма продуктов окисления)» (ГОСТ 22054). Сущность данного метода заключается в окислении испытуемого образца бензина кислородом воздуха при 110 °С в течение 6 часов под давлением, создаваемым насыщенными парами испытуемого бензина, и в последующем определении суммарного содержания образовавшихся смол и осадка [2]. Аналогичный метод был разработан и в США (ASTM D 873, Modified) [4]. Одним из методов определения склонности бензина к окислению является метод «медной чашки». Сущность метода заключается в определении количества образующихся в бензине смол при его выпаривании из медной чашки [1]. Однако эти методы не позволяют прогнозировать время, через которое содержание смол в анализируемом образце бензина достигнет предельного значения, установленного стандартами.

В исследовательской практике химическую стабильность бензинов определяют путем оценки количества поглощенного им кислорода в процессе окисления при атмосферном или небольшом избыточном давлении. Одни из первых методов такого рода описаны в работах [5; 6].

Методики оценки химической стабильности бензинов по доле поглощенного кислорода разрабатываются и в настоящее время. Так, в патенте [7] в качестве информационного показателя, характеризующего интенсивность протекания химических превращений в бензинах, предлагается использовать расчетный показатель, учитывающий долю поглощенного кислорода образцом, находящимся под избыточным давлением кислорода при температуре 120 °С в течение 180 минут.

Для подтверждения возможности использования полученных результатов оценки химической стабильности по доле поглощенного кислорода для определения возможного срока хранения автомобильного бензина авторами было проведено опытное хранение образцов автомобильного бензина в стальных канистрах КС-20 в неотапливаемом хранилище в средней климатической зоне (Московская область) в течение 30 месяцев. Критерием изменения качества бензина при опытном хранении выбрано изменение концентрации фактических смол (определение проводилось по ГОСТ 1567) как показателя качества, наиболее склонного к изменению в процессе длительного хранения. Скорость окисления была рассчитана как прирост концентрации фактических смол за единицу времени. Изменение качества хранимых бензинов оценивалось через каждые шесть месяцев хранения.

Полученные данные позволили сделать вывод о наличии корреляции между уровнем химической стабильности (по доле поглощенного кислорода) и возможным сроком хранения автомобильного бензина – чем больше доля поглощенного кислорода, тем меньше возможный срок хранения бензина. При этом были определены следующие сроки хранения бензинов:

- для длительного хранения (в течение 3–5 лет) пригодны бензины с долей поглощенного кислорода до 25 %;
- для кратковременного хранения (до 1 года) пригодны бензины с долей поглощенного кислорода от 25 до 85 %;
- немедленному использованию по назначению подлежат бензины с долей поглощенного кислорода более 85 %.

Применение изобретения, по мнению авторов [7], позволит повысить достоверность и сократить время определения химической стабильности автомобильных бензинов любого углеводородного состава за счет создания условий ускоренного жидкофазного окисления автомобильных бензинов, с одновременным определением их срока хранения в канистрах.

Для определения содержания углеводородного состава бензинов используются различные хроматографические методы, а также способность некоторых углеводородов, в частности олефинов, вступать в

реакции с йодом или бромом. Однако химические методы оценки стабильности бензинов также не получили распространения либо вследствие необходимости использования дорогостоящего оборудования, либо от того, что склонность углеводородов к окислению в условиях хранения и их способность к взаимодействию с какими-либо веществами не всегда совпадают. Например, хлорное олово реагирует со всеми диеновыми углеводородами, в то время как в процессах окисления участвуют в первую очередь диеновые углеводороды с сопряженными связями [1].

Давно замечено, что чем больше смолистых соединений содержится в бензине, тем больше отложений образуется во впускной системе двигателя. В связи с этим были разработаны методы определения количества продуктов окисления в бензине, в максимальной степени приближенных или воспроизводящих условия его применения на соответствующих двигателях (ГОСТ 1567, ISO 6246, СТБ ИСО 6246, ASTM D 381, IP 131, DIN 51784). Сущность этих методов заключается в испарении определенного объема бензина при заданных температурах и расходе воздуха с последующим определением массы образующегося остатка. Этот остаток принято называть «фактическими» смолами, т.е. смолами, присутствующими в бензине на момент испытания. Это название не совсем точное, так как в процессе продувки бензина воздухом при повышенных температурах происходит его окисление и образование новых смол, которые в дальнейшем определяются как «фактические». Кроме того, в остатке, помимо смол, остаются все нелетучие в условиях испытания продукты, в частности высокомолекулярные компоненты присадок. В связи с этим различают непромытые смолы – остаток от выпаривания автомобильного бензина, состоящий из фактических смол и трудноиспаряющихся компонентов присадок, и фактические смолы – часть остатка от выпаривания бензина, нерастворимая в гептане, или смолы, промытые растворителем.

Вместе с повышением содержания смол в бензине начинает увеличиваться и кислотность. Однако предельное её значение достигается обычно после того, как бензин становится некондиционным по содержанию фактических смол. Поэтому такой показатель, как кислотность, для современных бензинов не регламентируется.

На основании имеющегося опыта длительного хранения нефтепродуктов установлено, что наиболее склонным к изменению при длительном хранении показателем, характеризующим химическую стабильность бензинов, является содержание в нем фактических смол [8].

Согласно СТБ 1656 концентрация смол промытых растворителем в бензине, определяемая в соответствии с СТБ ИСО 6246, не должна превышать 5 мг на 100 мл бензина.

Таким образом, в настоящее время наиболее информативным показателем, характеризующим химическую стабильность бензинов, является содержание в них фактических смол. Данный показатель также может быть использован для оценки эффективности вводимых в бензин антиокислительных присадок. Однако, как и метод СПО (ГОСТ 22054), он не позволяет прогнозировать время, через которое содержание смол в анализируемом образце бензина достигнет предельно допустимого значения и поэтому не может быть использован при оценке срока хранения бензинов. В связи с этим разработка новых относительно простых и информативных методик прогнозирования химической стабильности бензинов является актуальной задачей.

Исследовательская часть. Целью настоящей работы является изучение динамики накопления смол в бензине при его ускоренном окислении и анализ возможности оценки на её основе химической стабильности бензина.

В качестве объекта исследования был выбран бензин марки АИ-92-К5-Евро, свойства образцов которого приведены в таблице. Установлено, что исследованные образцы бензинов соответствуют требованиям СТБ 1656-2011 и оба относятся к классу D – «зимний» (период использования с 1 ноября по 31 марта), а образец № 2 также соответствует требованиям к классу B – «летний» (период использования с 1 апреля по 30 сентября). Оба образца бензина также относятся к классу D1 – «переходный» (период использования с 1 по 31 октября), значения их индексов испаряемости не превышают максимально допустимого значения «1150» и равны соответственно «1004,6» и «850,9».

Стойкость к окислению (индукционный период окисления) образца товарного бензина № 1 составила более 14321 минуты, т.е. более 238 часов. При этом окончание индукционного периода не было достигнуто, а содержание смол в результате окисления возросло с 0 до 174 мг/100 мл. Стойкость к окислению образца бензина № 2 составила более 8899 минут. При этом окончание индукционного периода также не было достигнуто, а концентрация смол в результате окисления образца возросла в 53,6 раза с 1,3 до 69,7 мг/100 мл.

Сущность предлагаемого метода ускоренной оценки динамики накопления смол в бензинах при их окислении заключается в окислении нескольких образцов исследуемого бензина в условиях СТБ ИСО 7536 в течение различного периода времени, с последующим определением в них фактических смол, промытых растворителем по СТБ ИСО 6246. Также определяется содержание фактических смол в исходных неокисленных образцах бензина. Выбор продолжительности окисления образцов бензина осуществляет-

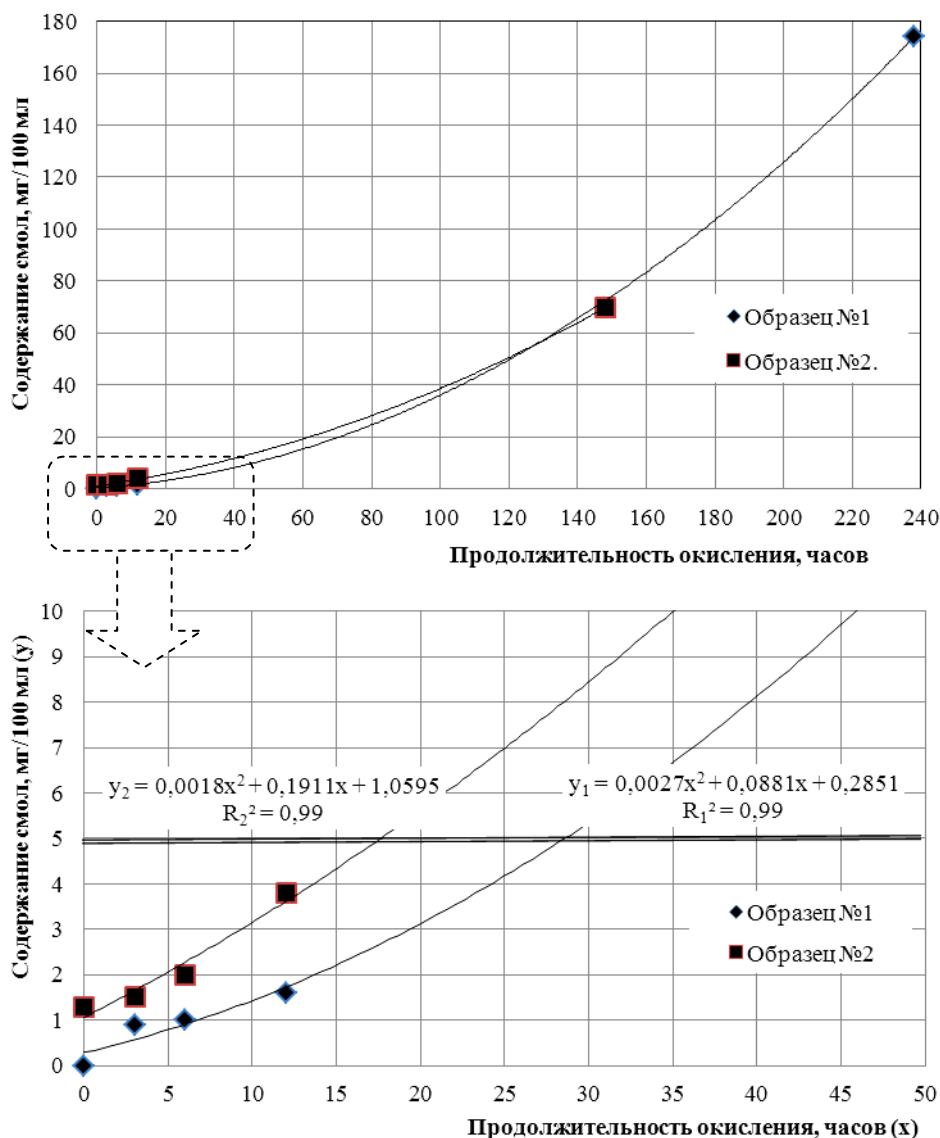
ся таким образом, чтобы содержание смол как минимум у двух образцов одного и того же бензина было меньше предельного значения, равного 5 мг/100 мл бензина (СТБ 1656), и как минимум у одного образца был выше указанного предельного значения. Затем строятся графики зависимости содержания смол в исследуемых образцах бензина от продолжительности окисления и определяется продолжительность окисления бензинов, при которой содержание в них смол достигает предельного значения в 5 мг/100 мл бензина. После чего рассчитывается устойчивость исследуемых образцов бензина к образованию смол в процессе окисления в процентах относительно друг друга или относительно наименее устойчивого к окислению образца.

Свойства образцов товарного бензина марки АИ-92-К5-Евро

Показатель	Норма (СТБ 1656-2011)	Значение для образца	
		№ 1	№ 2
Октановое число (исследовательский метод)	не менее 92,0	92,2	93,3
Октановое число (моторный метод)	не менее 83,0	85,1	86,1
Содержание свинца, мг/дм ³	не более 5,0	0,0023	0,01
Плотность при 15 °С, кг/м ³	720,0...775,0	735,8	739,8
Содержание серы, мг/кг	не более 10,0	5,4	3,0
Стойкость к окислению, мин	не менее 360	более 14321	более 8899
Содержание смол (промытых растворителем), мг/100 мл	не более 5	0,0	1,3
Испытание на медной пластинке	класс 1	класс 1	класс 1
Внешний вид	соответствие	соответствие	соответствие
Содержание олефиновых углеводородов, % об.	не более 18,0	0,33	0,59
Содержание ароматических углеводородов, % об.	не более 35,0	33,8	34,2
Содержание кислорода, % масс.	не более 2,70	0,00	0,00
Содержание бензола, % об.	не более 1,0	0,1	0,3
Давление насыщенных паров, кПа	(класс В) 45...70 (класс D) 60...90	77,50	60,10
Объемная доля испарившегося бензина:			
при 70 °С (Е70), % об.	(класс В) 20...48 (класс D) 22...50	32,8	35,7
при 100 °С (Е100), % об.	46,0...71,0	52,2	53,7
при 150 °С (Е150), % об.	не ниже 75,0	85,0	84,5
Температура конца кипения, °С	не выше 210,0	193,0	192,0
Остаток в колбе, % об.	не более 2,0	1,0	1,0
Содержание железа, мг/дм ³	отсутствие	отсутствие	отсутствие
Содержание марганца, мг/дм ³	отсутствие	отсутствие	отсутствие
Плотность при 20 °С, кг/м ³	не нормируется	732,0	735,2

В настоящей работе динамика накопления смол оценивалась по изменению содержания в исследуемых образцах бензина фактических смол через 3, 6 и 12 часов окисления, а также ранее полученные данные – содержание смол в образце № 1 после 14321 минуты окисления и в образце № 2 после 8899 минут окисления. Результаты исследований представлены на рисунке.

Анализ полученных данных показал, что динамика изменения содержания смол в анализируемых образцах бензинов при их окислении описывается полиномиальными регрессионными уравнениями второй степени с коэффициентом корреляции, близким к 1. В начальный период окисления наблюдается достаточно пологий рост содержания смол в образцах бензина, а затем интенсивность образования смол значительно возрастает. Это объясняется тем, что образующиеся в процессе окисления соединения являются катализаторами, ускоряющими дальнейшее окисление топлива. Поэтому этот процесс является самоускоряющимся, или автокаталитическим. В частности, смолистые вещества в бензине образуются в результате окислительной полимеризации и конденсации продуктов распада гидроперекисей с участием неуглеводородных примесей [1]. Выявленные закономерности не противоречат результатам исследований, приведенным в работе [9], согласно которым при хранении бензинов при температуре 43,3 °С (110 °F) в присутствии кислорода воздуха содержание смол вначале возрастает практически линейно, до величины от 5 до 20 мг смол на 100 мл бензина в зависимости от его химического состава, а затем наблюдается интенсивный рост содержания смол в бензине.



Влияние продолжительности окисления образцов бензина марки АИ-92-К5 в условиях СТБ ИСО 7536 на изменение содержания в них смол

Таким образом, проведенные исследования позволили определить продолжительность периода окисления исследованных образцов товарного бензина в условиях СТБ ИСО 7536, по истечении которого содержание смол в бензине достигает максимально допустимого значения – 5 мг/100 мл (СТБ 1656). Так, максимально допустимое содержание смол в образце бензина № 1 достигается через 28,5 часа окисления, т.е. через 1710 минут, а в образце № 2 – через 17,7 часа, или 1062 минуты. Следовательно, можно утверждать, что при одинаковых условиях срок хранения образца бензина № 1 по показателю «Содержание смол, промытых растворителем» приблизительно на 38 % больше, чем у образца № 2.

Известно, что наибольшей склонностью к окислению и смолообразованию обладают непредельные углеводороды. Сравнительно легко также окисляются алкилароматические углеводороды, склонность к окислению которых возрастает с увеличением длины и числа алкильных заместителей в молекуле. Наибольшей устойчивостью к окислению обладают алкановые и циклоалкановые углеводороды. С ростом молярной массы их склонность к окислению увеличивается. При этом вероятность присоединения кислорода по связи С–Н с образованием гидроперекисей возрастает в ряду: первичный → вторичный → третичный атом углерода [1; 10].

Исходя из вышесказанного, полученные результаты можно объяснить различием углеводородного состава исследованных образцов бензина. Причиной более высокой устойчивости к образованию смол образца № 1 по сравнению с образцом № 2, вероятно, является более низкое содержание в его составе потенциально химически нестабильных олефиновых и алкилароматических углеводородов на 0,26 и 0,4 % об. соответственно (см. таблицу).

Закключение. В результате проведенных исследований установлено, что динамика образования смол в образцах товарного бензина при его ускоренном окислении в одинаковых условиях может заметно отличаться даже для бензинов одной марки, имеющих относительно близкие свойства и углеводородный состав. Следовательно, предлагаемый метод обладает достаточно высокой чувствительностью и потенциально пригоден для оценки относительной химической стабильности различных бензинов. Вышеуказанный метод может быть использован при выборе партии бензина, предназначенного для длительного хранения, имеющего наибольший запас качества по содержанию фактических смол, т.е. позволяет выбрать товарный бензин с наибольшим сроком годности по данному показателю качества. Предлагаемый метод также может быть использован для оценки эффективности вводимых в бензин антиокислительных присадок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуреев, А.А. Применение автомобильных бензинов / А.А. Гуреев. – М.: Химия, 1972. – 368 с.
2. Гуреев, А.А. Квалификационные методы испытаний нефтяных топлив / А.А. Гуреев, Е.П. Серегин, В.С. Азев. – М.: Химия, 1984. – 200 с.
3. Фомин, Г.С. Нефть и нефтепродукты. Энциклопедия международных стандартов / Г.С. Фомин, О.Н. Фомина. – М.: Изд-во «Протектор», 2006. – 1040 с.
4. Stavinoha, L.L. Evaluation of motor gasoline stability / L.L. Stavinoha, J.N. Bowden. Interim report. BFLRF № 266 // Belvoir Fuels and Lubricants Research Facility (SwRI) Southwest Research Institute San Antonio, Texas and M.E. LePera U.S. Army Belvoir Research, Development and Engineering Center Materials, Fuels and Lubricants Laboratory Fort Belvoir, Virginia, December 1990. – 98 p.
5. Иванов, К.И. Об особенностях действия замедлителей на кинетику автоокисления углеводородов / К.И. Иванов, Е.Д. Вилянская // Химия и технология топлив и масел. – 1957. – № 4.
6. Лосиков, Б.В. Метод исследования кинетики окисления и термоокислительной стабильности нефтепродуктов / Б.В. Лосиков, И.А. Рубинштейн, Е.П. Соболев // Химия и технология топлив и масел. – 1960. – № 7.
7. Способ определения химической стабильности автомобильных бензинов: пат. RU 2 391 661, МПК G01N 33/22 / К.В. Шаталов, Е.П. Серегин, А.Н. Приваленко (RU), № 2009111546/04; заявл. 31.03.2009; опубл.: 10.06.2010 // Бюл. № 16. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2010.
8. Об утверждении Инструкции о порядке обеспечения качества горючего в Вооруженных Силах Республики Беларусь: приказ М-ва обороны Респ. Беларусь от 27 июля 2006 г. № 26 / Банк законов. Информационный портал Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bankzakonov.com/republic_pravo_by_2010/blockp5/rf-e8l8r0/index.htm. – Дата доступа: 07.05.2014.
9. Schwartz, Frank G. STORAGE STABILITY OF GASOLINE: Development of a stability prediction method and studies of gasoline composition and component reactivity / Frank G. Schwartz, Charles S. Allbright, Cecil C. Ward. – Washington, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines. 1972. – 60 p.(U.S. Bureau of Mines. Bulletin 660).
10. Иванов, К.И. Промежуточные продукты и промежуточные реакции автоокисления / К.И. Иванов; под ред. Н.И. Черножукова. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной лит., 1949. – 196 с.

Поступила 26.05.2014

METHODS OF THE ASSESSMENT OF CHEMICAL STABILITY OF AUTOMOBILE GASOLINES

A. YERMAK, S. HOROSHKO, I. BURAYA

Existing methods and criteria of an assessment of chemical stability of automobile gasolines are considered. It is shown, that now the most objective indicator characterizing chemical stability of gasolines, the content in them the gums is. The technique of an assessment of dynamics of accumulation of gums in gasoline is offered at its accelerated oxidation. Results of studying of properties of samples of gasoline of the RON-92-K5-EURO, and influences of duration of their oxidation in the conditions of STB ISO 7536 on change of the content of gums in them are given. It is shown, that the offered method possesses rather high sensitivity and is potentially suitable for an assessment of relative chemical stability of automobile gasolines. The possible directions of practical application of an offered technique of an assessment of dynamics of accumulation of gums in automobile gasoline are offered at its accelerated oxidation.

УДК 665.658.26

**КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ГИДРООБЕССЕРИВАНИЯ
ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА НА УСТАНОВКЕ Л-24/6**

**С.В. ВЕЛИКОВ; канд. хим. наук, доц. С.В. ПОКРОВСКАЯ;
канд. техн. наук Ю.А. БУЛАВКА
(Полоцкий государственный университет)**

Представлены результаты исследования работы реактора гидроочистки дизельного топлива установки Л-24/6 ОАО «Нафтан» за годовой период с момента пуска. Определены основные кинетические показатели процесса гидрообессеривания: порядок реакции и кажущаяся энергия активации, которые позволили установить зависимости роста требуемой средневзвешенной температуры катализатора при увеличении объемной производительности реактора, при повышении содержания серы в сырье и снижении содержания серы в продукте. Описана методика определения срока эксплуатации каталитической системы при различных режимах работы установки с помощью нормализации средневзвешенной температуры. Предложена кинетическая модель каталитической системы реактора, в качестве входных переменных которой задаются объемная производительность установки, содержание серы в сырье, требуемое содержание серы в продукте, результатом расчета являются значения средневзвешенной температуры катализатора при заданных условиях. Выполнена проверка адекватности модели.

Введение. С течением времени требования к дизельным топливам регулярно повышаются. Главные цели ужесточения спецификаций на топлива – повышение качества последних, охрана окружающей среды, защита здоровья человека. Особое внимание уделяется экологической безопасности дизельных топлив. В большинстве промышленно развитых стран вопросы по ограничению содержания вредных веществ в выхлопных газах автомобилей (твердых частиц, оксидов углерода, серы и азота) решаются на государственном уровне. Снижению вредности выхлопных газов транспортных средств способствует производство экологически чистых топлив.

В январе 2012 года Республика Беларусь вступила в единое экономическое пространство с Российской Федерацией и Республикой Казахстан. На основании Соглашения о единых принципах и правилах технического регулирования Таможенного союза (ТС) разработан Технический регламент ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» [1], который вступил в действие 31 декабря 2012 года. Особенностью регламента является введение понятия экологического класса топлива – классификационного кода (К2, К3, К4, К5), определяющего требования безопасности топлива. Для Республики Беларусь не допускается выпуск и обращение дизельного топлива классов К2 и К3, дизельное топливо класса К4 допускается реализовывать до 31 января 2014 года. Помимо технического регламента, качество дизельного топлива регулируется государственным стандартом СТБ 1658-2012 «Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Топливо дизельное. Технические условия» [2].

Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ 1658-2012 практически полностью соответствует европейскому стандарту EN590:2009 «Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods», отметим лишь особенности последнего. Во-первых, согласно EN 590:2009 с 1 января 2009 года допускается реализация ДТ с содержанием серы не выше 10 мг/кг. Во-вторых, допустимая массовая доля полициклических ароматических углеводородов ограничена на уровне 11 %.

С момента введения в ЕС стандарта EN 590 (1996) изменения требований к ДТ в ряду Еуро-1...Еуро-5 затрагивали в первую очередь содержание серы, которое ступенчато снижалось с 2000 до 10 ppm, а также минимального цетанового числа. Последнее при очередном пересмотре стандарта в 2000 году (Еуро-3) поднято с 49 до 51 пункта [3]. Кроме этого, в последние годы в стандарте регламентируется содержание метиловых эфиров жирных кислот, что обусловлено все более широким распространением биодизельных топлив в странах Евросоюза. Возможно увеличение допустимого объемного содержания метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) до 10 %, что потребует изменения требований к окислительной стабильности дизельных топлив [6]. В Республике Беларусь технические требования к МЭЖК предъявляет государственный стандарт СТБ 1657-2012 «Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Метиловые эфиры жирных кислот для дизельных двигателей».

Достижение установленных на настоящий момент ограничений по содержанию серы в ДТ является достаточно сложной задачей для современных НПЗ. Развивается направление унификации требований по серосодержанию дизельных топлив, предназначенных для дорожного транспорта, и топлив для внедорожного применения, например, железнодорожного, судового транспорта, сельскохозяйственной техники, дизелей генераторных установок и других. На долю последних приходится около 10 % рынка, но

их вклад в загрязнение окружающей среды значительно превосходит загрязнение от автотранспорта [4]. В странах ЕС еще в 2009 году содержание серы в ДТ для внедорожного применения снижено до 10 ppm, хотя временно сохранены определенные исключения с возможностью использования топлив с серосодержанием до 500 ppm. Аналогичные изменения законодательства США, где содержание серы в ДТ для дорожного транспорта ограничено 15 ppm, запланировано на 2014 год. Требования к содержанию серы в дизельных топливах в различных странах представлены в таблице 1 [5].

Таблица 1

Требования к содержанию серы в дизельном топливе

Регион	Год	Содержание серы в ДТ, ppm	
		для дорожного транспорта	для внедорожного применения
Европейский Союз	2005	50	500
	2009	10	10
США и Канада	2006	15	500
	2007	15	500
	2014	15	15
Япония	2004	50	500
Южная Корея	2006	50	500
Австралия	2006	50	500

Для ОАО «Нафтан» достижение требований по содержанию серы и полициклических ароматических углеводородов в дизельном топливе не является проблемой, что обусловлено качеством перерабатываемой нефти. Однако для снижения содержания серы до 10 мг/кг (экологический класс K5 в соответствии с требованиями ТР ТС 013/2011) необходима комплексная модернизация существующего оборудования. С этой целью на установке Л-24/6 ОАО «Нафтан» введен в действие новый реакторный блок.

Методы исследований. Поскольку процесс гидроочистки ДТ направлен в первую очередь на удаление серы, в работе изучена кинетика реакций обессеривания. Процесс гидрообессеривания протекает в реакторе аксиального типа, в котором на поверхности твердого катализатора происходит взаимодействие жидкого и частично испаренного сырья с водородсодержащим газом. В исследуемом реакторе использована каталитическая система компании Альбемарле, представляющая собой комбинацию инертных компонентов, вспомогательных малоактивных катализаторов и основного алюмокобальтмолибденового катализатора марки KF-757.

На кинетику процесса гидроочистки оказывает влияние значительное число факторов: температура реакции, фракционный состав сырья, время контакта сырья с катализатором, равномерность распределения потока по сечению реактора, продолжительность работы катализатора, общее давление в системе и, в частности, парциальное давление водорода, парциальное давление сероводорода и другие. Некоторые из этих параметров являются неконтролируемыми и трудно устанавливаемыми в условиях работы коммерческой установки. Управление процессом гидроочистки осуществляется в первую очередь изменением температуры в зоне реакции. Данный параметр входит в одно из основных уравнений химической кинетики – уравнение Аррениуса:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}}, \quad (1)$$

где k – константа скорости реакции; A – предэкспоненциальный множитель, характеризующий частоту столкновений взаимодействующих молекул; E_a – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Поскольку температура изменяется по высоте реактора, принято использовать средневзвешенную температуру слоя катализатора:

$$WABT_i = \frac{1}{3}T_{i,in} + \frac{2}{3}T_{i,out}, \quad (2)$$

$$WABT = \frac{\sum (WABT_i \cdot V_i)}{\sum V_i}, \quad (3)$$

где $WABT_i$ – средневзвешенная температура i -го слоя катализатора; $T_{i,in}$, $T_{i,out}$ – соответственно температура на входе и температура на выходе i -го слоя катализатора; V_i – объем i -го слоя катализатора.

Использование для расчетов уравнения Аррениуса позволяет установить взаимосвязь между временем реакции (или обратной величиной – объемной скоростью подачи сырья LHSV), содержанием серы в сырье и продукте, средневзвешенной температурой. Влияние остальных параметров (содержание водорода, давление в системе, расход водородсодержащего газа (ВСГ) и др.) в данном случае не учитывается, поскольку их значение изменяется незначительно на протяжении всего периода работы установки.

Результаты и их обсуждение. С целью изучения кинетики процесса гидрообессеривания проанализированы технологические параметры и данные лабораторных анализов за годовой период работы установки.

Кинетическое уравнение для реакций удаления серы имеет вид [7]:

$$\frac{dC_S}{dt} = -kC_S^n, \quad (4)$$

где C_S – содержание серы; k – константа скорости реакции; n – порядок реакции.

При начальных условиях $t = 0$ и $C_S = C_{S,ex}$, конечных условиях $t = LHSV^{-1}$ и $C_S = C_{S,вых}$ аналитическое решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$k = LHSV \cdot \ln \frac{C_{S,вых}}{C_{S,ex}}, \text{ при } n = 1, \quad (5)$$

$$k = \frac{LHSV}{n-1} \cdot \left(\frac{1}{C_{S,вых}^{n-1}} - \frac{1}{C_{S,ex}^{n-1}} \right), \text{ при } n \neq 1. \quad (6)$$

Порядок реакции был определен методом подстановки при помощи электронных таблиц. Основываясь на литературных данных [8], был выбран возможный диапазон порядка реакции от 0,1 до 2,0 с шагом 0,1. Для тех суток, когда установка работала в установившемся режиме, были рассчитаны значения констант скоростей реакции при различных принятых порядках реакции по уравнениям (5) и (6), затем были определены коэффициенты вариации. В результате было выявлено, что в изучаемом процессе гидроочистки реакции обессеривания протекают по порядку $n = 0,8$ по сере.

Логарифмированием уравнения (1) можно получить формулу линейной зависимости T^{-1} (в данном случае $WABT^{-1}$) от $\ln(k)$:

$$\ln(k) = -\frac{E_a}{R} \cdot WABT^{-1} + \ln(A). \quad (7)$$

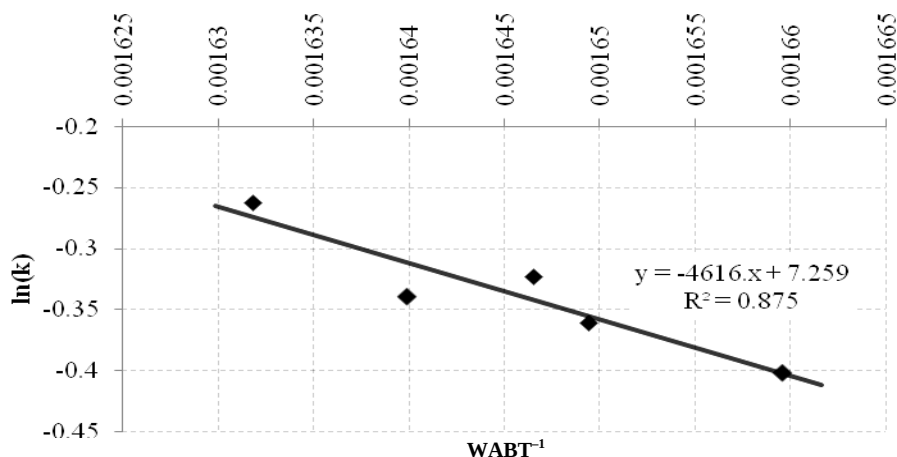
Согласно уравнениям (5), (6), константа скорости реакции k является функцией серосодержания сырья, серосодержания продукта, объемной скорости подачи сырья. Влияние остальных технологических параметров на кинетику процесса заключено в предэкспоненциальном множителе A . В работе было принято допущение, что большинство технологических параметров (кратность циркуляции ВСГ, давление в системе, содержание водорода в ВСГ и другие), за исключением $WABT$, на протяжении всего времени работы реактора в установившемся режиме изменяется незначительно и их влиянием можно пренебречь. На основании этого допущения были выбраны пять суток, в течение которых в реакторе поддерживалась различная температура, степень обессеривания различалась, а значения остальных технологических параметров были максимально близки. Указанные характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2

Выборка для расчета кажущейся энергии активации

День пробега	$WABT$, °C	$C_{S,ex}$, % масс.	$C_{S,вых}$, мг/кг	F_{BCI}/F_S , $\text{нм}^3/\text{м}^3$	ρ_s , $\text{кг}/\text{м}^3$	P_{ex} , кПа, (изб.)	$P_{вых}$, кПа, (изб.)	X_{H_2} , % об.
105	339,66	0,980	4,20	519,18	849,0	4867	4648	75,22
150	336,65	0,892	6,14	510,50	846,7	4843	4633	76,10
167	334,20	0,810	3,31	520,60	842,0	4867	4655	76,80
173	329,41	0,800	10,50	512,71	845,5	4865	4657	79,78
186	333,13	0,853	7,10	506,17	847,6	4867	4656	80,77

На рисунке 1 представлен график линейной функции $\ln(k) = f(WABT^{-1})$. Известно, что тангенс угла наклона графика к оси абсцисс равен $(-E_a/R)$, исходя из этого установлена кажущаяся энергия активации (E_a), которая составила 38384 Дж/моль.

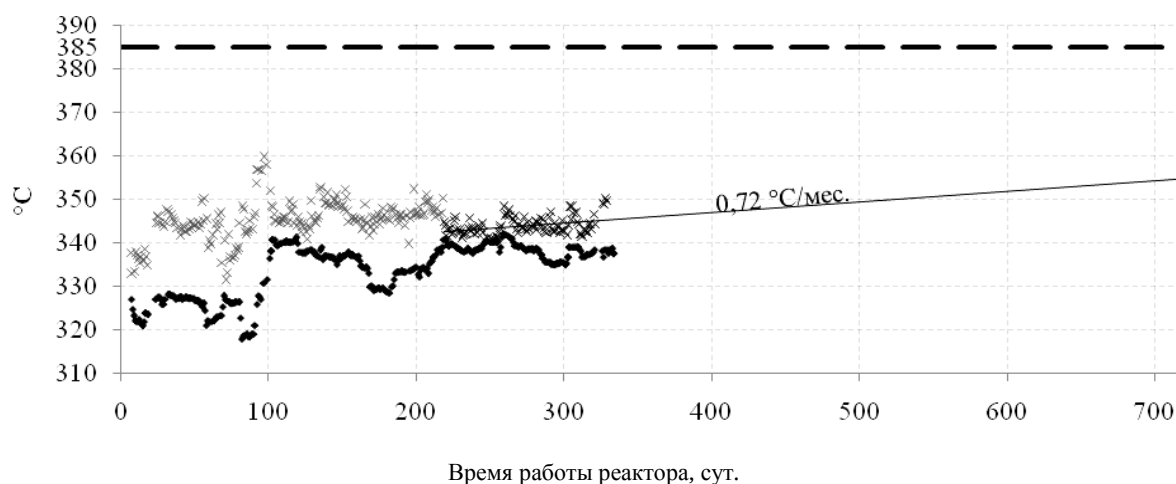
Рис. 1. График функции $\ln(k) = f(WABT^{-1})$

Процедура нормализации температуры позволяет определить требуемую средневзвешенную температуру для неких заданных значений содержания серы в сырье и продукте, производительности установки по сырью [9]. При этом подразумевается, что остальные параметры работы установки равны фактическим значениям, что позволяет приравнять предэкспоненциальные множители уравнения Аррениуса для фактических и целевых условий:

$$\frac{k_{\text{факт}}}{e^{\frac{E_a}{R \cdot WABT_{\text{факт}}}}} = \frac{k_{\text{цел}}}{e^{\frac{E_a}{R \cdot WABT_{\text{цел}}}}} \quad (8)$$

В результате логарифмирования и упрощения приведенного выше уравнения для каждого суток работы установки из анализируемого периода (исследуемый период работы реактора гидроочистки принят продолжительностью 334 суток) было рассчитано значение $WABT_{\text{цел}}$. В качестве целевых были приняты средние значения производительности установки (108,4 м³/ч), серосодержания сырья (0,886 % масс.) и продукта (9,083 мг/кг) за исследуемый период.

На рисунке 2 приведена линия тренда $WABT_{\text{цел}}$, полученная на основе данных второй половины пробега реактора, позволяющая спрогнозировать скорость дезактивации катализатора и оставшийся срок его службы. Расчетная скорость дезактивации составила 0,72 °C/мес.

Рис. 2. Предполагаемый график роста $WABT$.
(темными маркерами указаны фактические значения $WABT$; X-образными – нормализованные)

Таким образом, фактически получена кинетическая модель реактора гидроочистки, однако в уравнение линии тренда со временем требуется вносить коррективы на актуальные параметры процесса с целью уточнения прогноза.

На рисунке 3 с помощью предлагаемой модели определены зависимости средневзвешенной температуры от объемного расхода сырья, содержания серы в продукте и содержания серы в сырье.

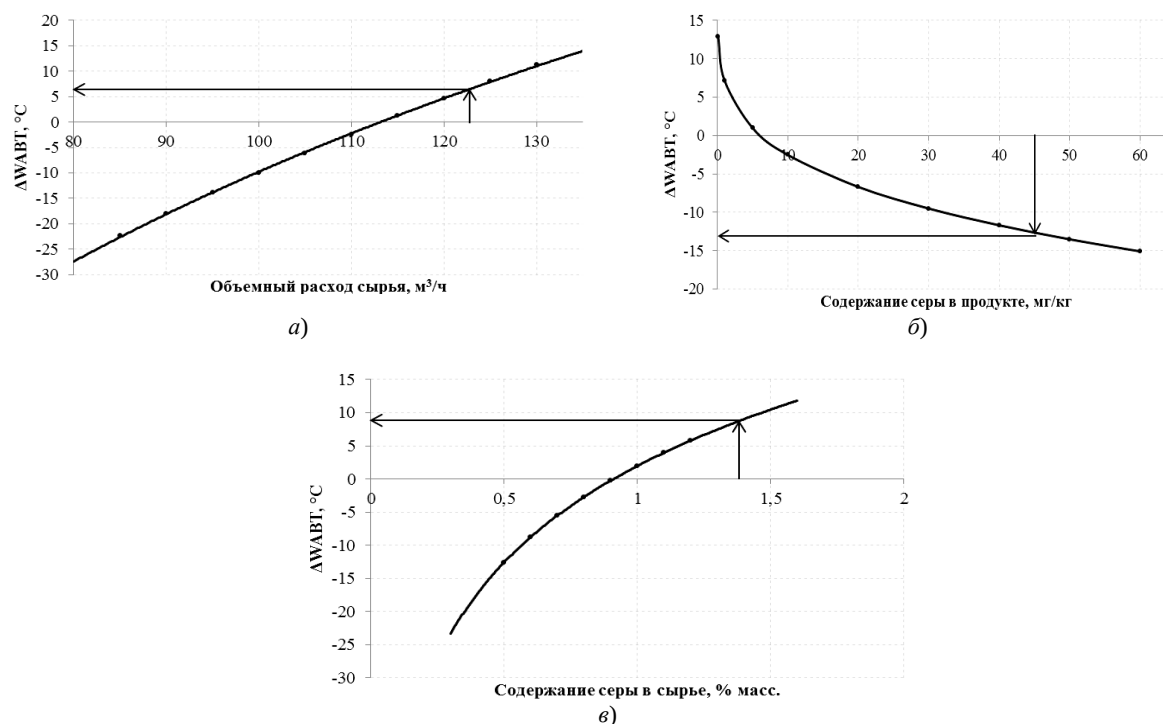


Рис. 3. Зависимость средневзвешенной температуры от объемного расхода сырья (а), содержания серы в продукте (б) и содержания серы в сырье (в)

Полученные графические зависимости позволяют прогнозировать требуемый температурный режим работы реактора при необходимости изменения производительности установки либо требуемой степени обессеривания.

Предлагаемая кинетическая модель процесса удаления серы в реакторе имеет три входные переменные: объемная производительность сырья, содержание серы в сырье, требуемое содержание серы в продукте. При проведении расчетов, осуществляемых при помощи электронных таблиц, определяются значения требуемой средневзвешенной температуры катализатора. Выдаваемые значения распространяются на прошедший период пробега, то есть показывают, при какой температуре требовалось вести процесс в конкретные сутки при заданных условиях. По рассчитанным значениям $WABT$ можно осуществлять прогнозирование для последующего периода. Однако следует учитывать ряд ограничений. Так, не следует моделировать температурный режим для слишком отдаленного периода времени. Также не рекомендуется при задании входных величин значительно выходить за рамки фактических их значений. Для созданной модели это 85...125 м³/ч дизельной фракции, 0,5...1,2 % масс. серы в сырье и 0,1...60 мг серы на килограмм гидроочищенного дизельного топлива. Кроме этого следует иметь в виду, что на протяжении большей части времени работы катализатора температура возрастает линейно, в то время как в начале и в конце цикла скорость роста температуры выше. Это объясняется тем, что в начале цикла катализатор очень активен, и только после достижения определенной равновесной степени закоксованности активность его стабилизируется. Ближе к концу цикла чрезмерный рост отложений кокса вынуждает интенсивнее поднимать температуру катализатора, что в свою очередь интенсифицирует процесс коксообразования.

Выполнена проверка адекватности кинетической модели. Для проверки адекватности модели обработаны данные для расчета значений $WABT$ за последующие 185 суток работы установки (суммарный пробег составил 519 сут.).

На рисунке 4, а представлена фактическая динамика средневзвешенной температуры в реакторе совместно с модельным графиком. Для прогнозирования использовались средние значения F_c , $C_{S,ex}$, $C_{S,был}$ за период стабильной работы катализатора (219...334 сут.).

На рисунке 4, б график рассчитанной при помощи модели средневзвешенной температуры скорректирован на средние для прогнозируемого (335...519 сут.) периода значения входных переменных. Светлыми маркерами обозначены данные, по которым была построена модель (1...334 сут.); сплошной

линией показан прогнозируемый рост WABT, который получен при помощи созданной кинетической модели; темными маркерами отмечены фактические значения WABT в прогнозируемом периоде.

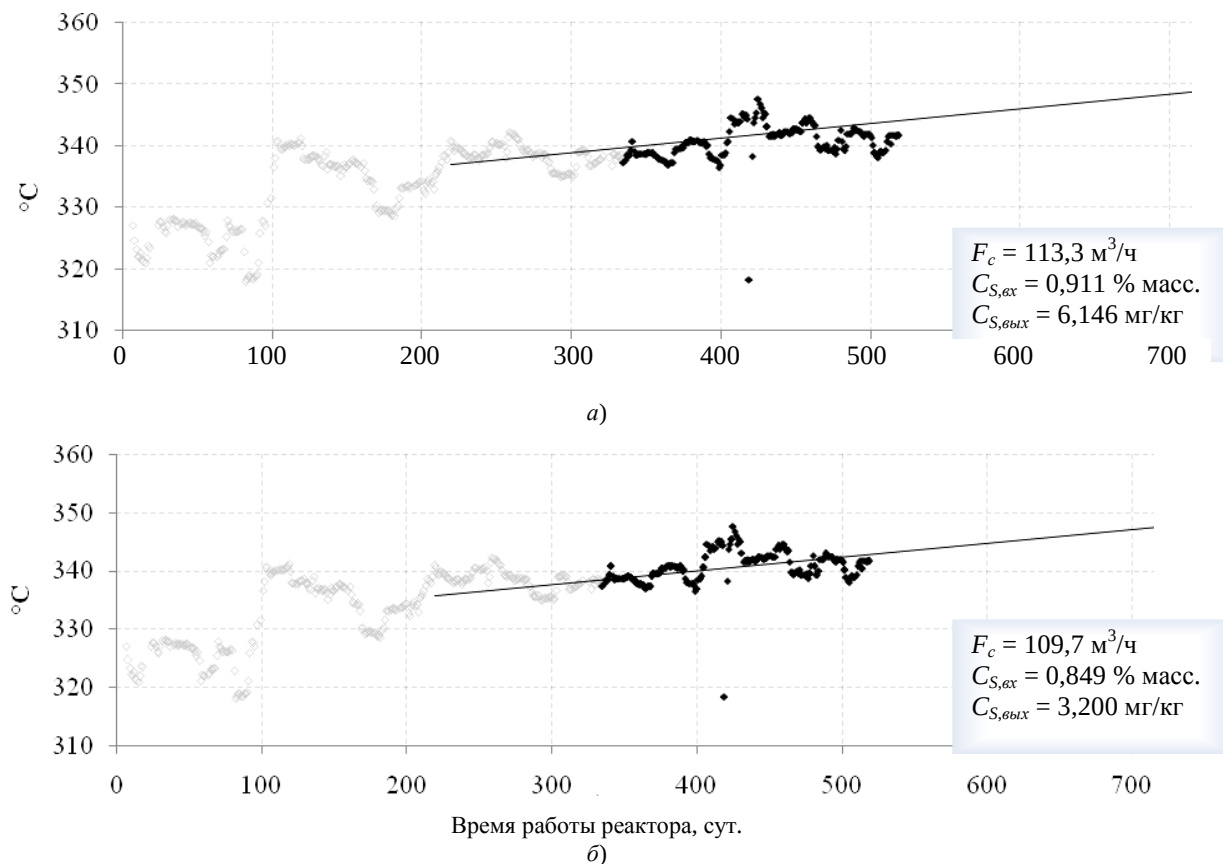


Рис. 4. Прогнозирование WABT по доступным на 334-е сутки пробега данным (а) и проверка модели по фактическим параметрам работы за 335...519-е сутки пробега (б)

На рисунке 5 показано, что кинетическая модель с достаточной точностью прогнозирует рост средневзвешенной температуры катализатора.

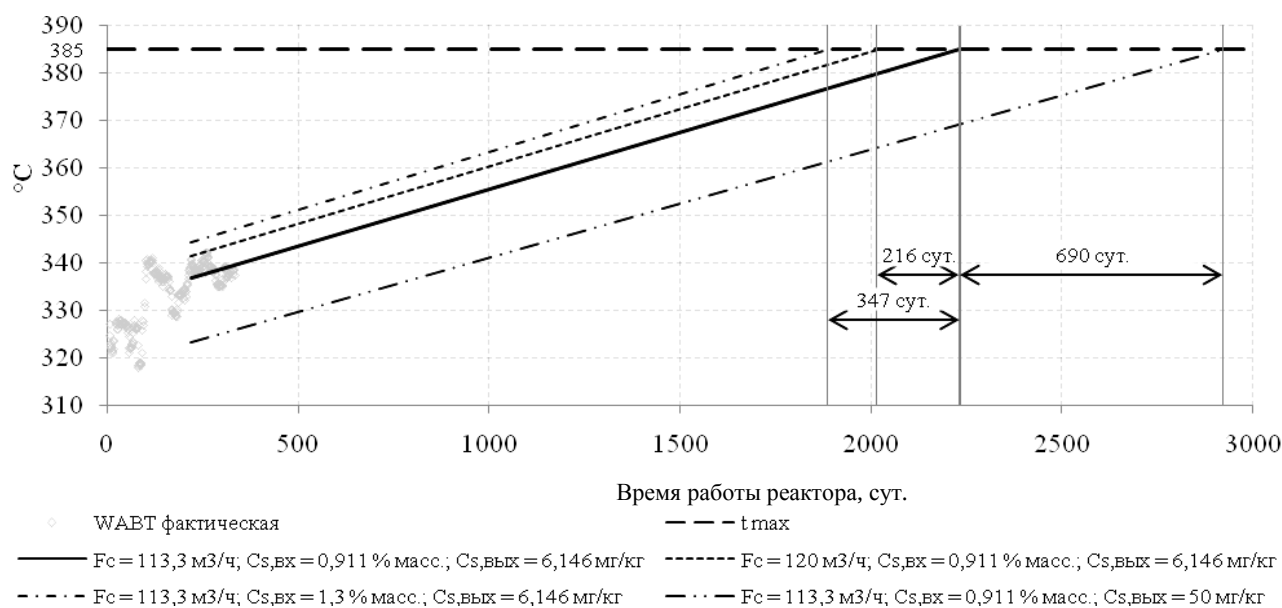


Рис. 5. Прогнозирование продолжительности пробега катализатора

Выводы. В результате анализа кинетических закономерностей процесса гидрообессеривания дизельного топлива на установке Л-24/6ОАО «Нафтан» установлено:

1) использование полученной модели позволит прогнозировать остаточный срок эксплуатации каталитической системы на основании конкретных данных, а не субъективной оценки, что актуально для организации, эксплуатирующей установку гидроочистки;

2) полученный модельный график нормализованной температуры предоставляет более эффективный метод поиска причин отклонений от технологического режима установки;

3) получена возможность моделировать влияние основных технологических и качественных параметров – производительность установки по сырью, содержание серы в сырье и продукте – на требуемую температуру в зоне реакции.

Таким образом, кинетическая модель дает возможность продлить срок службы каталитической системы за счет поддержания меньшего запаса по качеству, при этом не допуская выпуск некондиционной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту: ТР ТС 013/2011. – Введ. 31.12.12.
2. Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Топливо дизельное. Технические условия: СТБ 1658-2012. – Введ. 01.01.13. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2012. – 16 с.
3. EN 590[Electronic resource]. – Wikipedia, the free encyclopedia. – Mode of access: http://www.wikipedia.org/wiki/EN_590. – Date of access: 20.01.2014.
4. Капустин, В.М. Технология переработки нефти. / В.М. Капустин, А.А. Гуреев. – Ч. 2: Деструктивные процессы. – М.: КолосС, 2007. – 334 с.
5. Are you ready for ULSD? // Catalyst & Technology News. – 2004. – February/March. – С. 1.
6. Actual standardization initiatives. Future of EN 14214 and EN 590. Biodiesel: Improvement On Standards, Coordination Of Producers & Ethanol Studies: Brussels, March 26, 2008.
7. Технологические расчеты установок переработки нефти / М.А. Танатаров [и др.]. – М.: Химия, 1987. – 352 с.
8. Fahim, M.A. Fundamentals of Petroleum Refining / M.A. Fahim, T.A. Al-Sahhaf, A.S. Elkilani. – Kidlington: Elsevier, 2010. – 496 p.
9. CatalystsAcademy: материалы семинара Albemarle по гидроочистке, Новополоцк, 2012.

Поступила 23.09.2014

KINETIC REGULARITIES OF HYDRODESULFURIZATION OF DIESEL FUEL AT THE L-24/6

S. VELIKOV, S. POKROVSKAYA, Y. BULAUKA

The article presents the study of diesel hydrotreating reactor L-24/6 "Naftan". The statistical data describing the operation of the plant for a year has been collected and processed throughout the study. The main kinetic parameters of the hydrodesulfurization – reaction order and activation energy – was determined. With these known parameters the relationship between the reactor capacity, sulfur content of the feed and product and average bed temperature was set. The article describes a method of determining the lifetime of the catalyst system under different operating conditions by normalizing the temperature. The kinetic model of the catalytic reactor system was created. The liquid hourly space velocity, the sulfur content in the feedstock, the desired sulfur content in the product are input variables. The result of the calculation is the value of the weighted average bed temperature under the given conditions. The adequacy of the model was tested in this study.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Шелег В.К., Данильчик С.С.</i> Точение конструкционных сталей с наложением на подачу инструмента асимметричных колебаний	2
<i>Данилов В.А., Данилов А.А.</i> Анализ и реализация методов формообразования некруглых поверхностей профильных моментопередающих соединений	8
<i>Голембиевский А.И.</i> Расширение технических возможностей кинематической структуры станка с механическими связями для обработки червяков чашечным резцом	18
<i>Довнар С.С., Якимович А.М., Ковалева И.Л., Шумский И.И.</i> Гармонический анализ порталов тяжелых продольно-фрезерных станков типа «Гентри» с помощью МКЭ	24
<i>Киселев М.Г., Дроздов А.В., Габеев В.Л., Ямная Д.А.</i> Теоретическая оценка влияния параметров циркуляционного движения заготовки на интенсивность ее распиливания	37
<i>Капительян И.А.</i> Формирование рельефа рабочих поверхностей деталей машин под газотермическое напыление	44
<i>Сиваченко Л.А., Курочкин Н.В., Киркор М.А., Бондарев Р.А., Сиваченко Т.Л.</i> Новое технологическое оборудование для комплексной переработки пищевого сырья растительного происхождения	52
<i>Дайняк И.В., Бегун Д.Г., Поляковский В.В.</i> Интегрированная система многокоординатных перемещений для сборочного оборудования микроэлектроники	59
<i>Хорольская М.С., Саленко А.Ф., Дудан А.В., Николайчук В.Я., Ворона Т.В., Кожневникова Е.Е.</i> Повышение работоспособности элементов гидрорежущих устройств с помощью функционально-ориентированного подхода	65
<i>Бойправ О.В., Борботько Т.В., Лыньков Л.М.</i> Экраны электромагнитного излучения на основе влагосодержащего порошкообразного перлита	75
<i>Павлечко В.Н., Протасов С.К.</i> К вопросу о теоретическом давлении радиального нагнетателя с учетом силы Кориолиса	81
<i>Иванов В.П., Кастрюк А.П., Вигерина Т.В.</i> Выбор материала для восстановления валов наплавкой с учетом его физико-механических свойств	85
<i>Белоцерковский М.А., Чекулаев А.В.</i> Влияние режимов газопламенного напыления полимерными шнурами на свойства формируемых покрытий	91
<i>Жорник В.И.</i> Эволюция структуры дисперсной фазы пластичных смазок при трибозаимодействии и ее влияние на ресурс узлов трения	97
<i>Гречихин Л.И., Иващенко С.А., Комаровская В.М.</i> Упрочнение алюминия и его сплавов наноразмерными многослойными покрытиями	106
<i>Шматов А.А.</i> Упрочняющий эффект термогидрохимической обработки инструментальных материалов	112
<i>Дудан А.В., Ворона Т.В., Довжук С.А., Брусило Ю.В., Салимов Р.М., Волков Ю.В.</i> Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей автомобилей электродуговым напылением	121
<i>Андруш В.Г.</i> Выбор рационального режима обкатки ремонтируемых двигателей	127
<i>Иванов В.П., Мозолевский Д.В., Кузьменко В.Н., Полховская А.С., Артюшевская Н.В., Ермакова Н.С.</i> Аудит безопасности дорожного движения на магистральной улице крупного города	134
<i>Мозолевский Д.В., Кузьменко В.Н., Полховская А.С., Артюшевская Н.В., Ермакова Н.С.</i> Совершенствование организации дорожного движения в зоне размещения социальных объектов	140

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Ермак А.А., Хорошко С.И., Бурая И.В.</i> Методы оценки химической стабильности автомобильных бензинов	147
<i>Великов С.В., Покровская С.В., Булавка Ю.А.</i> Кинетические закономерности процесса гидрообессеривания дизельного топлива на установке Л-24/6	153