

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

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



ВЕСНИК ПОЛОЦКАГА ДЗЯРЖАУНАГА УНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

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

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиностроения и машиноведения, материаловедения и металлургии, химической техники и технологии.

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

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

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

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

Подписано к печати 26.02.2015. Бумага офсетная 70 г/м². Формат 60×84¹/₈. Ризография.
Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 16,82. Тираж 100 экз. Заказ 468.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.91.04

УПРАВЛЕНИЕ ТОПОЛОГИЕЙ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБРАБОТАННЫХ ПО СХЕМАМ НЕПОЛНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

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

Рассмотрено формирование компонента топологии обработанной некруглой поверхности в виде отклонений от номинальной поверхности, обусловленных неполным ее профилированием методами касания и прерывистого обката. Решена задача расчета этих отклонений для типовых схем приближенного профилирования некруглых поверхностей при возможных вариантах контакта формируемой и формирующих производящих линий. Рассмотрены схемы обработки некруглых поверхностей с совмещенными и разделенными движениями профилирования и резания дисковым и цилиндрическим эксцентрично установленными многолезвийными инструментами. Проанализированы пути управления топологией некруглых поверхностей, обработанных по схемам с конструктивным перемещением режущих зубьев многолезвийного режущего инструмента, за счет режима резания, многократного формирования поверхности в одном цикле обработки, разделения движений профилирования и резания.

Объектом данного исследования являются схемы частичного формообразования некруглых замкнутых поверхностей с конгруэнтными криволинейными участками многолезвийными инструментами при профилировании по схемам с конструктивными перемещениями режущих зубьев.

Постановка задачи. Некруглые цилиндрические и конические поверхности с регулярным профилем являются рабочими поверхностями деталей профильных моментопередающих соединений, которые применяются вместо шлицевых и шпоночных в трансмиссиях различных машин, инструментальных системах и приборах благодаря эксплуатационным и технологическим преимуществам: выше усталостная прочность и долговечность, ниже уровень шума, меньше себестоимость и др. [1]. Разработка производительных методов обработки таких поверхностей требуемого качества и средств их реализации является актуальной задачей, имеющей важное практическое значение для расширения применения профильных соединений в отечественном машиностроении.

Качество обработанной поверхности характеризуется ее микрорельефом – отклонениями от номинальной поверхности в виде шероховатости и волнистости. Эти отклонения определяют топологию обработанной поверхности [2], влияющую на эксплуатационные свойства детали (износостойкость, усталостную прочность и др.). К компонентам топологии некруглой поверхности, обработанной по схеме неполного (частичного) формообразования, следует отнести также ее отклонения от номинальной поверхности, обусловленные схемой профилирования. Такие отклонения неизбежны, например, при профилировании некруглых поверхностей методами прерывистого обката и касания [3]. Характерным для них является точечный контакт формируемых режущими кромками поверхностей резания с номинальной поверхностью детали и образование обусловленных схемой формообразования отклонений обработанной поверхности от номинальной в виде выступов – несрезанной части припуска на обработку.

Следует отметить, что отклонения, обусловленные схемой профилирования поверхности, имеют другую природу и могут быть более значимыми по сравнению с отклонениями, определяемыми схемой резания, пластическим деформированием микронеровностей и другими факторами в процессе обработки, поэтому они должны быть рассчитаны при проектировании технологического процесса обработки детали исходя из реализуемой схемы формообразования некруглой поверхности.

Управление топологией поверхности при ее обработке осуществляется с целью создания на обработанной поверхности определенного регулярного микрорельефа для придания ей необходимых свойств [4] или для обеспечения заданной точности обработанной поверхности, при которой высота ее отклонений от номинальной поверхности находится в допустимых пределах, что позволяет управлять в процессе обработки производительностью формообразования. В обоих случаях необходим расчет высоты отклонений обработанной поверхности от номинальной, которые определяются по нормали к последней. В данной работе эта задача решается для отклонений, связанных с профилированием некруглых поверхностей, исходя из основного допущения теории формообразования – в процессе обработки технологическая система оказывает на заготовку только то воздействие, которое предусмотрено процессом формообразования, при этом технологическая среда пассивна и не оказывает влияния, не предусмотренного процессом формообразования [5].

Естественно, предпочтительны схемы формообразования некруглых поверхностей с минимальными значениями указанных отклонений. Их минимизация необходима для обеспечения требуемого качества обработанной поверхности или для снижения трудоемкости последующей ее обработки. В этой связи важны, с одной стороны, количественная оценка высоты отклонений обработанной поверхности от номинальной, а с другой – разработка методов управления ею. Рассмотрим эти задачи применительно к профилированию некруглых поверхностей методам касания и прерывистого обката.

Формирование погрешностей обработанной поверхности, обусловленных схемой формообразования. Формообразование любой поверхности осуществляется в результате относительного движения заготовки и инструмента (движения формообразования), сопровождаемого срезанием слоя металла в пределах припуска на обработку. За время контакта каждой из режущих кромок с заготовкой создается элементарная поверхность, образующей которой является образующая поверхности резания. Пересечение множества поверхностей, образованных всеми режущими кромками за время обработки, является обработанной (реальной) поверхностью, соответствующей в определенной степени номинальной поверхности изделия.

Производящие элементы режущих зубьев инструмента в процессе обработки контактируют с обрабатываемой номинальной поверхностью, осуществляя полное или частичное ее формообразование. Полное формообразование возможно, если обеспечено отображение производящих элементов на все точки номинальной поверхности. При невыполнении этого условия имеет место неполное (частичное) формообразование с определенными отклонениями обработанной поверхности от номинальной, что характерно для обработки некруглых поверхностей многолезвийными вращающимися инструментами.

При профилировании таким инструментом некруглой поверхности методом копирования, например фасонной фрезой [6], отклонения образуются только в продольном направлении (вдоль направляющей поверхности). Их высота, обусловленная схемой формообразования, зависит от радиуса инструмента и величины подачи на зуб, поэтому управление этими отклонениями осуществляется за счет режима резания. При профилировании методами касания и прерывистого обката обработанная поверхность M_o имеет отклонения от номинальной поверхности по всем координатным направлениям, так как формируется множеством пересекающихся элементарных поверхностей $\{M_{\alpha}\}$, т.е. $(M_o = \{M_{\alpha}\})$. Номинальная поверхность в этом случае конгруэнтна огибающей одного или нескольких семейств элементарных поверхностей $(M_o \cap M_n = \{P_i\})$. Контакт элементарной поверхности с номинальной некруглой поверхностью, выражаемый множеством P_i , обычно осуществляется в точке, поэтому неизбежна погрешность формообразования в виде отклонений обработанной поверхности от номинальной.

Степень приближения обработанной поверхности к номинальной зависит от соответствия формы производящих элементов инструмента и траектории движения формообразования производящим линиям номинальной поверхности, а также от количества элементарных поверхностей, которыми формируется обработанная поверхность. Возможность увеличения их количества за счет числа режущих зубьев инструмента для рассматриваемых схем профилирования ограничена конструктивными факторами (диаметром инструмента, углом между режущими зубьями и др.). В этой связи заслуживает внимания метод повышения точности за счет многократного профилирования поверхности в одном цикле обработки. Практически это достигается совмещением процессов частичного формообразования поверхности, что равнозначно увеличению числа режущих зубьев инструмента и позволяет управлять высотой отклонений обработанной поверхности от номинальной.

Определение погрешности профилирования некруглой поверхности. Под профилированием некруглой замкнутой цилиндрической или конической поверхности понимается формирование производящей линии этой поверхности в плоском сечении, перпендикулярном ее оси, которое при частичном формообразовании возможно методами касания и прерывистого обката. Различие между ними состоит в том, что в первом случае профиль поверхности образуется как линия, касательная к множеству вспомогательных линий – траекторий его точечных производящих элементов, а во втором – как огибающая множества положений линейных производящих элементов (режущих кромок) инструмента [7]. Таким образом, в обоих случаях вместо производящей линии поверхности формируется лишь конечное множество принадлежащих ей точек (базовых точек), вследствие чего обработанная поверхность отличается от номинальной. Пространство между базовыми точками, образующими номинальной и обработанной поверхностей, ограничивающими несрезанную часть припуска, определяет форму и размеры отклонений обработанной поверхности от номинальной.

Типовые схемы профилирования выпуклых и вогнутых участков некруглых поверхностей методами следа и прерывистого обката и соответствующая им форма отклонений обработанной поверхности от номинальной приведены на рисунке 1, где K_1 – кривизна формируемой линии – образующей L_1

(профиля) номинальной поверхности ($K_1 = 1/r$); K_2 – кривизна формирующей линии L_2 ($K_2 = 1/R$); $K^+(K^-, K^0)$ – характеристика кривизны этих линий, соответственно положительная (отрицательная, равная нулю); $r(R)$ – радиус кривизны линии $L_1(L_2)$; l – расстояние между соседними точками контакта линий L_1 и L_2 (базовыми точками); Δ – погрешность профилирования.

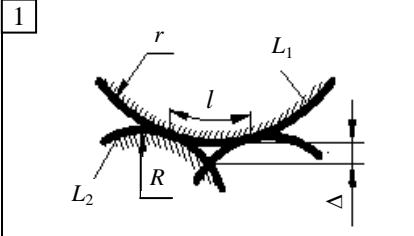
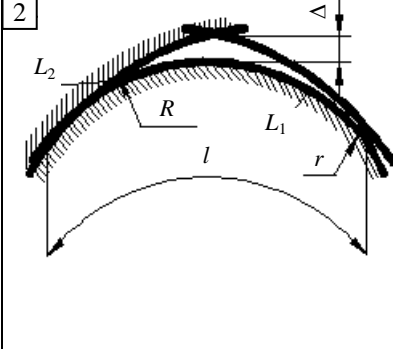
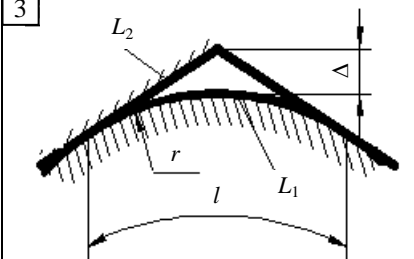
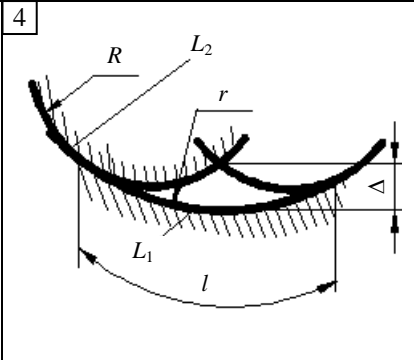
Форма контакта	Схема профилирования	Погрешность профилирования
$K_1^+ - K_2^-$	1 	$\Delta = (r + R) \cdot \cos \frac{l}{2r} - r - \sqrt{R^2 - (r + R)^2 \cdot \sin^2 \frac{l}{2r}}$ $\Delta \approx cl^2 \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)$
$K_1^+ - K_2^-$ $ K_1 > K_2 $	2 	1. $r < R$; $\Delta \approx cl^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$ $\Delta = (r - R) \cdot \cos \frac{l}{2r} - r + \sqrt{R^2 - (r - R)^2 \cdot \sin^2 \frac{l}{2r}}$ 2. $r > R$; $\Delta \approx -cl^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right)$ $\Delta = (R - r) \cdot \cos \frac{l}{2r} + r - \sqrt{R^2 - (r - R)^2 \cdot \sin^2 \frac{l}{2r}}$
$K_1^+ - K_2^0$ $K_1^- - K_2^0$	3 	$\Delta = r \left(\cos \frac{l}{2r} - 1 \right)$ $\Delta \approx \frac{cl^2}{r}$
$K_1^- - K_2^+$ $ K_1 > K_2 $	4 	1. $R < r$; $\Delta \approx cl^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$ $\Delta = (R - r) \cdot \cos \frac{l}{2r} + r - \sqrt{R^2 - (r - R)^2 \cdot \sin^2 \frac{l}{2r}}$ 2. $R > r$; $\Delta \approx -cl^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r} \right)$ $\Delta = (r - R) \cdot \cos \frac{l}{2r} - r + \sqrt{R^2 - (R - r)^2 \cdot \sin^2 \frac{l}{2r}}$

Рис. 1. Схемы приближенного профилирования некруглых поверхностей

Примечание. Во всех формулах $c = 0,125$.

Форма контакта определяется кривизной линий L_1 и L_2 , а в схемах 2 и 4 (см. рис. 1) также и соотношением значений r и R : возможно $r < R$ или $r > R$. Независимо от метода формообразования погрешность профилирования Δ , измеренная по нормали к номинальной поверхности, зависит от формы находящихся в контакте с ней формирующих обработанную поверхность линий. Расчетные зависимости

для определения погрешности профилирования Δ некруглых поверхностей приведены на рисунке 1 для рассматриваемых схем.

При условии, что кривизна выпуклой линии положительная, а вогнутой – отрицательная, и учитывая, что $\sin \alpha = \alpha$, $\cos \alpha = 1 - \alpha^2 / 2$; $\sqrt{1 \pm a} = 1 \pm a / 2$, где $a \ll 1$ [8], справедлива обобщенная для рассматриваемых четырех схем профилирования зависимость:

$$\Delta = 0,125l^2 (K_1 + K_2). \quad (1)$$

Конкретизация этой формулы для различных схем профилирования приведена на рисунке 1 в виде соответствующих зависимостей для расчета погрешности профилирования некруглой поверхности.

Из (1) следует, что управление точностью профилирования некруглой поверхности возможно за счет уменьшения кривизны K_2 формирующей линии и расстояния l между базовыми точками формируемой линии. Управление величиной K_2 и, следовательно, топологией обработанной поверхности при профилировании методом прерывистого обката обеспечивается путем изменения формы образующей инструментальной поверхности, которая может быть выпуклой ($K_2 > 0$), вогнутой ($K_2 < 0$) или прямой ($K_2 = 0$) в зависимости от геометрии профиля некруглой поверхности и требований к универсальности режущего инструмента. При профилировании некруглой поверхности методом касания вращающимся инструментом управление величиной K_2 возможно за счет изменения его радиуса.

Во всех случаях максимальная точность профилирования некруглой поверхности обеспечивается при минимальном значении для конкретных условий модуля алгебраической суммы $|K_1 + K_2|$ кривизн формируемой и формирующих линий, что соответствует оптимальной форме контакта обработанной и номинальной поверхностей. Например, для наиболее часто встречающегося случая обработки выпуклых некруглых поверхностей линия, формирующая профиль поверхности, должна быть вогнутой или прямой. Конкретные значения параметров K_1 и K_2 определяются на основе аналитического исследования геометрии номинальной поверхности детали, условий контакта с ней инструментальной поверхности и проходимости инструмента.

Управление топологией обработанной поверхности. Эффективным методом повышения точности профилирования является уменьшение расстояния l между базовыми точками формируемого профиля, поскольку согласно (1) высота отклонений Δ зависит от l в квадратичной зависимости. Повышение точности профилирования наиболее актуально для методов обработки некруглых валов по схемам с конструктивным перемещением режущих кромок в процессе формообразования. Из методов касания к ним относится способ обработки некруглых поверхностей некруглой или круглой эксцентрично установленной относительно оси вращения дисковой фрезой, а из методов обкатки – способ обработки эксцентрично установленной цилиндрической фрезой [3].

Характерным для этих способов обработки является упрощенная кинематика профилирования некруглой поверхности, основанная на двух согласованных вращательных движениях, так как функция кинематики формообразования частично перенесена на инструмент. Это достигается за счет того, что при соответствующей форме инструментальной поверхности режущие кромки при вращении получают перемещение в плоскости вращения (конструктивное перемещение) в соответствии с профилем некруглой поверхности. Необходимое условие формообразования замкнутой некруглой цилиндрической поверхности с равномерно расположенными по окружности конгруэнтными участками – выпуклая форма исходной инструментальной поверхности. Это условие выполняется, если образующая этой поверхности является огибающей не всего формируемого профиля, а одного из его конгруэнтных участков. При такой форме исходной инструментальной поверхности каждый из участков профиля некруглой поверхности обрабатывается за один оборот инструмента вокруг его оси, поэтому отношение частот вращательных движений инструмента и заготовки задается равным числу конгруэнтных участков формируемой поверхности, причем отношение мгновенных значений их угловых скоростей может быть постоянным или переменным в зависимости от профиля грани.

В частном случае исходная инструментальная поверхность представляет собой поверхность вращения, ось которой смещена на определенное расстояние от оси вращения инструмента, т.е. обработка осуществляется эксцентрично установленным дисковым инструментом, а профиль некруглой поверхности формируется как касательная к множеству положений производящей эксцентрично установленной окружности.

В соответствии с изложенным из множества возможных схем профилирования методом касания предпочтительной является схема (рис. 2, а), когда заготовка 1 получает вращение B_1 вокруг оси 2, а инструмент 3 – вращение B_2 вокруг оси 4, параллельной его геометрической оси 5, и подачу P_3 . Ось 4 смещена относительно его геометрической оси 5 на определенную величину в зависимости от профиля не-

круглой поверхности. Вследствие этого круглая исходная инструментальная поверхность имеет некруглую форму относительно оси 4 вращения инструмента, поэтому режущие кромки при вращении получают радиальное перемещение (конструктивную подачу), необходимое для профилирования некруглой поверхности. Движения B_1 и B_2 могут осуществляться в одном или различных направлениях, что соответствует встречной и попутной схемам обработки.

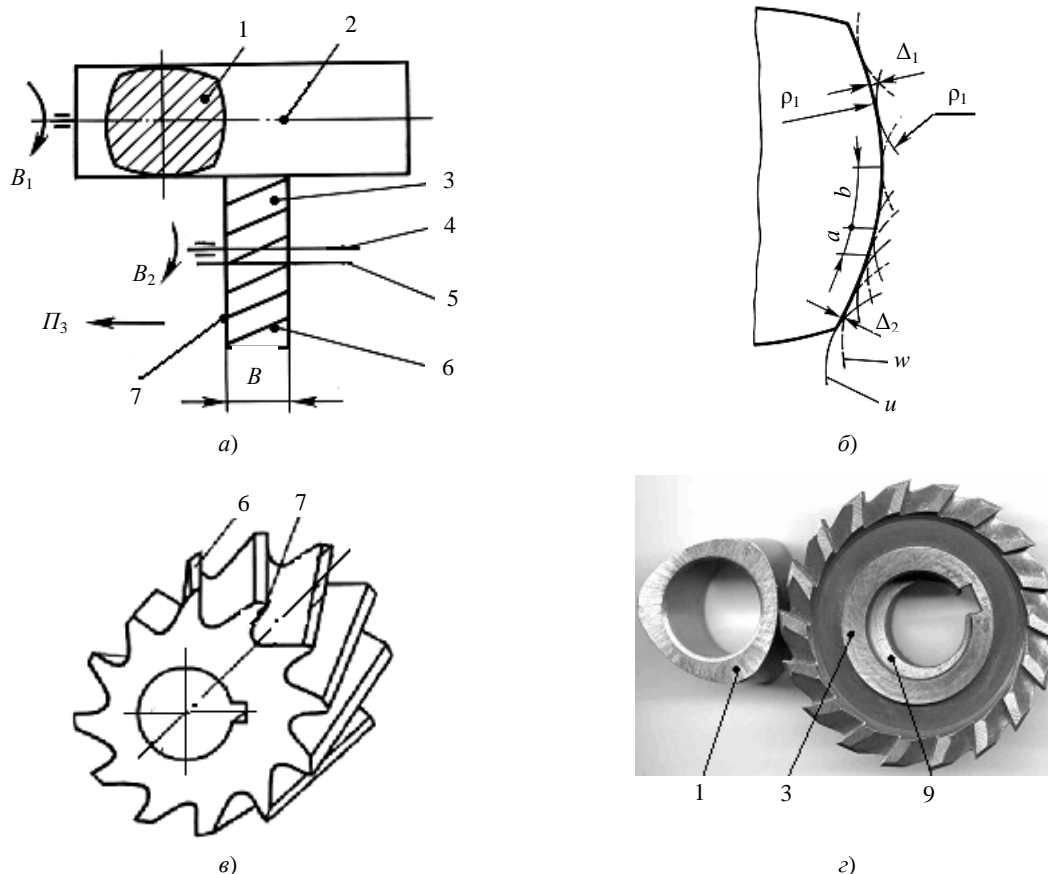


Рис. 2. Кинематическая схема обработки некруглой поверхности (а), схема ее профилирования (б) методом касания, конструктивная схема режущего инструмента (в), образцы детали с некруглой поверхностью и режущего инструмента (г)

Если некруглая поверхность имеет равномерно расположенные конгруэнтные участки (грани), то целесообразно, чтобы каждый из них формировался за один оборот инструмента, т.е. всеми его режущими зубьями. Это по сравнению с аналогичной схемой обработки некруглых поверхностей [9] позволяет повысить точность профилирования, поскольку она зависит от числа резцов (участвующих в профилировании режущих зубьев). В указанной известной схеме обработки некруглых (многогранных) поверхностей каждая грань формируется отдельным сектором инструмента с определенным числом режущих зубьев, меньшим в несколько раз общего числа зубьев инструмента. Количество этих секторов равно числу граней поверхности. Такое техническое решение, с одной стороны, усложняет конструкцию инструмента, его изготовление и заточку, превращает его в специальный режущий инструмент, а с другой – связано с увеличением погрешности профилирования поверхности из-за уменьшения в соответствующее число раз количества резцов, которыми профилируется каждая грань. При этом возрастает погрешность шага размещения граней по окружности, поскольку она зависит от погрешности расположения секторов с режущими зубьями на инструменте.

Формирование каждой грани за полный оборот инструмента, т.е. всеми его режущими зубьями, достигается при обработке некруглой поверхности эксцентрично установленной дисковой фрезой по схеме $[Kc - Ok - \Phi_{v,s}(B_1B_2)]$ (рис. 2, а, в) с совмещенными движениями профилирования и резания [3] при отношении частот вращательных движений инструмента и заготовки, равном числу граней поверхности. В этом случае существенно упрощается конструкция инструмента, многократно уменьшается высота отклонений и повышается точность профилирования некруглой поверхности благодаря идентичности условий формирования всех ее граней. При контакте с заготовкой вершины 7 режущих зубьев формиру-

ют поперечное сечение некруглой поверхности в виде множества кривых u (рис. 2, б), число M которых равно числу режущих зубьев инструмента. Высота отклонений Δ_1 в этом случае согласно (1) составит

$$\Delta_1 = 0,125b^2 \left(1/\rho_1 + 1/\rho_2 \right),$$

где ρ_1 – радиус кривизны профиля некруглой поверхности; ρ_2 – радиус кривизны траектории точки режущей кромки в зоне контакта с образуемым профилем; b – расстояние между соседними точками контакта формирующих кривых u с теоретическим профилем некруглой поверхности.

Заметим, что такую высоту имеют отклонения обработанной поверхности от номинальной при применении прямозубого инструмента. В этом случае из-за совмещения движений профилирования и резания невозможно управлять точностью формообразования, так как профиль каждой грани формируется ограниченным числом резов, равным числу зубьев инструмента. При недостаточной точности профилирования необходимо уменьшить высоту огранки, что возможно путём многократного профилирования поверхности повернутыми относительно друг друга множествами формирующих профиль кривых за счёт совмещения процессов частичного формообразования. Для повышения производительности важно обеспечивать указанное совмещение за время одного хода (цикла), что возможно кинематическим или геометрическим (конструктивным) путем. Так как первый путь связан с усложнением кинематической схемы обработки и соответственно станка, то предпочтителен второй путь, реализуемый за счет конструкции инструмента, в частности при оснащении его винтовыми (косыми) режущими зубьями (рис. 2, а, в).

Рассмотрим механизм профилирования некруглой поверхности таким инструментом. Так как режущие кромки b наклонены к оси инструмента, как показано на рисунках 2, в, з, то при сообщении ему подачи P_3 в каждом поперечном сечении некруглая поверхность неоднократно формируется за время одного хода (цикла обработки) каждый раз M кривыми w (показаны на рисунке 2, б штриховыми линиями), смещенными относительно множества кривых u вдоль профиля на величину $a = bS/B$, где S – подача инструмента за один оборот заготовки, B – ширина его режущей части. Поэтому высота Δ_2 отклонений профиля, образованного кривыми u и w , составляет

$$\Delta_2 = 0,125a^2 \left(1/\rho_1 + 1/\rho_2 \right).$$

Следовательно, $\Delta_1/\Delta_2 = b^2/a^2 = (B/S)^2$.

Таким образом, благодаря многократному профилированию поверхности число кривых, формирующих ее профиль, возрастает в B/S раз. Соответственно во столько же раз сокращается расстояние между базовыми точками. В результате высота отклонений по сравнению с обработкой прямозубым инструментом уменьшается в $(B/S)^2$ раз, что существенно повышает точность профилирования некруглых поверхностей методом касания.

Преимуществом конструктивного метода управления точностью профилирования некруглой поверхности является возможность применения простого по кинематике оборудования. Рассмотренная схема обработки реализована на широкоуниверсальном зубошлифцифрезерном станке модели ВС50 производства Витебского станкостроительного завода «Вистан» [10], который для этого оснащен сменным обрабатывающим модулем. Образец обработанной детали показан на рисунке 2, з. Ее профиль зависит от эксцентриситета установки фрезы 3 относительно оси вращения, величина которого настраивается, например, установкой соответствующей сменной эксцентричной втулки 9.

На рисунке 3, а изображена кинематическая схема формообразования некруглой поверхности эксцентрично установленной цилиндрической фрезой, также реализованной на станке модели ВС50.

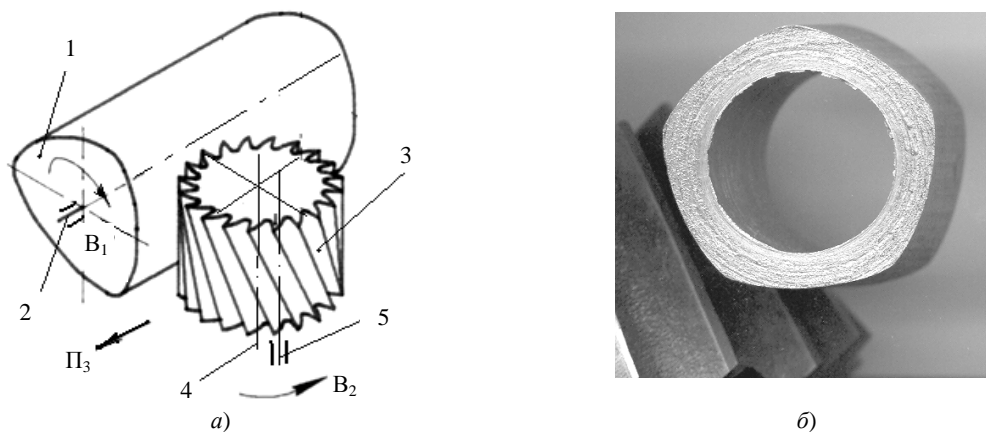


Рис. 3. Кинематическая схема обработки некруглой поверхности (а), образец детали с некруглой поверхностью и фрагмент режущей части инструмента (б)

В рассматриваемом выше случае некруглая поверхность профилируется методом прерывистого обката [3] по схеме [Об – Пр(Цн) – Ф(B_1B_2)]. В процессе обработки заготовке 1 сообщают вращение B_1 вокруг ее оси 2, а инструменту 3 – согласованное с ним вращение B_2 вокруг оси 5, параллельной геометрической оси 4, с частотой, в m раз большей частоты вращения заготовки, где m – число граней (выступов) у обработанной поверхности. Профилирование каждой грани осуществляется за один оборот инструмента множеством прямолинейных отрезков, число которых равно количеству граней. Высота образуемых в этом случае отклонений профиля обработанной поверхности от номинального определяется в соответствии со схемой 3, представленной на рисунке 1. Точность профилирования повышается при применении инструмента с вогнутой инструментальной поверхностью. Высота неровностей в этом случае определяется в соответствии со схемой 2 (см. рис. 1).

В обоих случаях имеет место частичное формирование профиля грани, который имеет с номинальной поверхностью z общих точек, где z – число режущих зубьев инструмента. Оно многократно увеличивается и, соответственно, повышается точность профилирования, при замене фрезы шевером или опилователем, позволяющими формировать качественно иную топологию обработанной поверхности.

Следует отметить, что такая замена при цилиндрической форме инструментальной поверхности у обоих инструментов не влияет на профиль формируемой поверхности, так как он образуется прямолинейным производящим элементом независимо от диаметра инструмента, который может быть различным у фрезы и инструмента для последующей обработки и изменяться при переточке фрезы. Это существенное преимущество данного способа обработки некруглых поверхностей по сравнению с обработкой

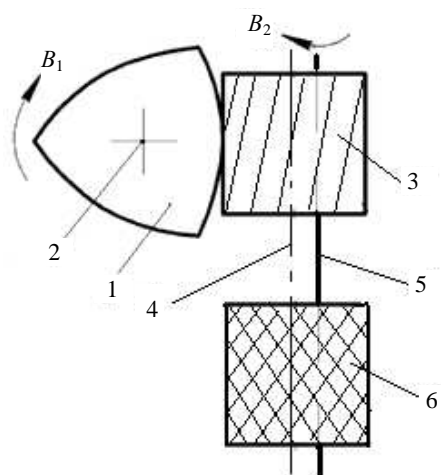


Рис. 4. Схема инструментальной наладки для последовательной обработки некруглой поверхности двумя инструментами

дисковой фрезой, профилирующей некруглую поверхность методом касания, при котором профиль обработанной поверхности и форма отклонений зависят от радиуса инструмента. Кроме того, отмеченное преимущество метода обката позволяет осуществлять комплексную обработку некруглой поверхности на одном станке последовательно вначале фрезой, а затем шевером, опилователем или иным инструментом с цилиндрической инструментальной поверхностью (рис. 4).

Для этого фрезу 3 и второй инструмент б (шевер, опилователь) устанавливают на общей оправке 5 с одинаковым эксцентриситетом, которой сообщают вращение B_2 , согласованное с вращением B_1 заготовки 1 вокруг оси 2. После завершения обработки заготовки фрезой 3 перемещением оправки 5 вместе с инструментальным шпинделем станка в обработку вводят второй инструмент б, которым окончательно формируют некруглую поверхность.

Универсальным методом повышения точности профилирования некруглых поверхностей при неполном формообразовании является раздельное выполнение движений профилирования и резания, что позволяет управлять соответствующими

параметрами схемы обработки и, следовательно, топологией обработанной поверхности. Это достигается при сообщении заготовке 1 (рис. 5) вращательного движения вокруг ее оси L_1 , а режущему инструменту 2 – двух независимых движений B_2 и O_3 (рис. 4, а) или B_2 и B_3 (рис. 4, б).

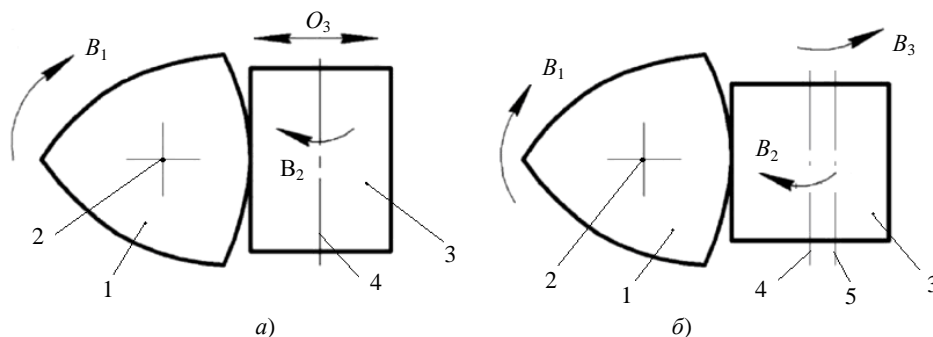


Рис. 5. Схемы обработки некруглых поверхностей с разделенными движениями профилирования и резания при сообщении режущему инструменту дополнительного осциллирующего движения (а) или вращательного движения (б)

В первом случае образуется сложное движение профилирования (подачи инструмента вдоль формируемого профиля) $\Phi_s(B_1O_3)$, а во втором – $\Phi_s(B_1B_2)$. Вращение B_2 инструмента вокруг его геометрической оси L_2 образует в обоих случаях простое исполнительное движение $\Phi_v(B_2)$, осуществляемое со ско-

ростью резания. В данном случае число резов, которым формируется профиль поверхности, не зависит от числа режущих зубьев инструмента, а задается путем управления скоростью движения подачи (профилирования) $\Phi_s(B_1B_2)$ исходя из допусковых отклонений профиля обработанной поверхности.

Заключение. Определяющим компонентом топологии некруглой поверхности, обработанной по схемам неполного формообразования, являются ее отклонения от номинальной поверхности, обусловленные схемой профилирования. Управление топологией обработанной некруглой поверхности с целью повышения точности профилирования и стабилизации отклонений при формообразовании методом касания с конструктивным перемещением производящих элементов инструмента обеспечивается за счет многократного профилирования поверхности в цикле обработки, а при формообразовании методом прерывистого обката – независимым выполнением и регулированием движений профилирования и резания. Управление топологией некруглой поверхности по длине детали осуществляется за счет регулирования подачи на зуб инструмента. Независимость формы некруглых профилей, образуемых методом обката, от диаметра инструмента, является основой эффективных способов последовательной или параллельной комплексной обработки заданной некруглой поверхности разными инструментами на одном станке по общей схеме формообразования, что позволяет повысить точность профилирования и производительность обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимченко, А.И. Профильные бесшпоночные соединения с равноосным контуром, их достоинства, недостатки, области применения и этапы внедрения / А.И. Тимченко // Вестн. машиностроения. – 1990. – № 11. С. 43–50.
2. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: учебник для вузов / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск: Выш. шк., 1999. – 374 с.
3. Данилов, В.А. Анализ и реализация методов формообразования некруглых поверхностей профильных моментопередающих соединений / В.А. Данилов, А.А. Данилов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 8–17.
4. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
5. Радзевич, С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / С.П. Радзевич. – К.: Растан, 2001. – 592 с.
6. Шитиков, А.Н. Проектирование сборных фрез для обработки наружного РК-профиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Н. Шитиков. – Тула: Тульский гос. ун-т, 2007. – 20 с.
7. Федотенок, А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А.А. Федотенок. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
8. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
9. Максименко, Ю.А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК- и К-профилем: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю.А. Максименко. – Курск: Юго-западный гос. ун-т, 2014. – 20 с.
10. Данилов, В.А. Новые технологии формообразования профильных и прерывистых поверхностей резанием / В.А. Данилов // Инженер-механик. – 2003. – № 3(20). – С. 26–31.

Поступила 15.01.2015

TOPOLOGY MANAGEMENT OF NON-CIRCULAR SURFACES TREATED UNDER THE SCHEME OF INCOMPLETE SHAPING

V. DANILOV, A. DANILOV

The formation of the component topology of treated non-circular surface in the form of deviations from the nominal surface due to its incomplete profiling by the methods of contact and intermittent rounding is analysed. Solved The problem of the calculation of these deviations for typical circuits of approximate profiling of non-circular surfaces with options contact formed and forming manufacturing lines is solved. Non-circular surface processing circuitry combined with and slow motion profiling and cutting disc and cylindrical eccentrically mounted multiple tip tools is considered. The ways of topology management of non-circular surfaces treated by the schemes with the structural movement of the cutting teeth of the multiple tip's cutting tool, due to the cutting conditions, the formation of multiple surfaces in one cycle of treatment, separation of motions profiling and cutting are analysed.

УДК 621.01

КОМБИНИРОВАННЫЕ ПОДКЛАССЫ ОБРАЗОВАНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ

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

Рассмотрена формализация отображения характеристического образа инструмента на виртуальные геометрические линии, образуемые технологической машиной при формообразующей обработке. Выявлены теоретические классы образования геометрических линий – образующей и направляющей, используемые для воспроизведения геометрических поверхностей, представляемых в виде следа, оставляемого образующей при ее перемещении по направляющей. Представлены теоретические классы воспроизведения геометрических поверхностей, полученные как сочетание двух линий – образующей и направляющей из множества классов образования геометрических линий. Выделены классы воспроизведения реальных поверхностей из многообразия теоретически возможных классов. Предложена методика комбинирования классов образования воспроизводящих линий между собой и на этой основе выявлены возможные комбинированные подклассы воспроизведения поверхностей. Приведены примеры комбинированных подклассов воспроизведения реальных поверхностей при формообразующей обработке.

Введение. Воспроизведение образующей или направляющей реальной поверхности на технологической машине (например, металлорежущем станке) в работах [1; 2] представлено в виде отображения характеристического образа P инструмента (например, резца, сверла, фрезы и т.п.) или физического явления (объекта), выполняющего его функцию (например, луча лазера, поля центробежных сил и т.п.) на виртуальную геометрическую линию, образуемую технологической машиной. При этом все многообразие видов образования воспроизводящих линий – образующей и направляющей – реальных поверхностей сводится к четырем геометрическим классам: прерывистому (Π), непрерывному при скольжении (H^c), непрерывному при качении (H^k), единовременному (E).

Сочетание каждого из названных классов воспроизведения образующей с каждым из тех же классов воспроизведения направляющей составляет следующее многообразие теоретически возможных классов образования поверхностей в пространстве и времени: $\Pi - \Pi$; $\Pi - H^c$; $\Pi - H^k$; $H^c - \Pi$; $H^c - H^c$; $H^c - H^k$; $H^k - \Pi$; $H^k - H^c$; $H^k - H^k$; $E - \Pi$; $E - H^c$; $E - H^k$; $E - E$. Из приведенного списка классы $\Pi - E$, $H^c - E$ и $H^k - E$ исключены как практически неосуществимые. В этих классах направляющая должна создаваться единовременно, т.е. зеркальным отображением характеристического образа. Полученная таким образом производящая линия обычно выполняет функцию образующей, так как имеет наиболее высокий темп воспроизведения. Направляющая производящая линия может быть создана зеркальным отображением характеристического образа только в том случае, когда образующая производящая линия создается также зеркальным отображением. Данный случай соответствует классу $E - E$ двойного зеркального отображения характеристического образа. Таким образом, в практике формообразующей обработки осуществимы 13 из 16 теоретически возможных геометрических классов образования поверхностей.

Методика создания комбинированных подклассов. Геометрические классы образования производящих линий, а следовательно, и реальных поверхностей при формообразующей обработке различаются количеством движений; темпом или производительностью образования воспроизводящих линий; протяженностью контакта характеристического образа и заготовки, существенно влияющими на качественные и энергетические параметры технологических процессов [2]. Указанными параметрами можно управлять, комбинируя классы образования воспроизводящих линий (образующей и направляющей) Π , H^c , H^k , E между собой.

Пусть при отображении характеристического образа P единовременно всем $M_j \subset P$ соответствует в множестве M взаимно однозначно и непрерывно семейство образов

$$A = \{f(M)_1, f(M)_2, \dots, f(M)_k\}.$$

Рассмотрим возможные варианты.

Образ $f(M)_i$ семейства (A) возникает во времени непрерывно как возрастающая последовательность составляющих его $f(x)_{ij}$. В этом случае получим единовременно непрерывные E^*H^c и E^*H^k подклассы образования производящей линии. Здесь и далее символ «*» обозначает комбинированный подкласс воспроизведения производящей линии.

Образ $f(M)_i$ семейства (A) возникает прерывисто во времени как последовательность составляющих его $f(x)_{ij}$. В этом случае подкласс образования производящей линии будет единовременно прерывистым $E^*\Pi$.

Подклассы E^*H^c , E^*H^k и $E^*П$ получены из исходного класса E посредством разбиения характеристического образа P на непересекающиеся множества M_j , каждое из которых отображается в множество M непрерывно или прерывисто.

Приведенное комбинирование классов от E к H^c , H^k и $П$ в реальных процессах формообразующей обработки при некоторых видах обработки; например, при резании позволяет управлять мгновенной протяженностью линии контакта инструмента и заготовки, что существенно улучшает течение технологического процесса. Назовем такое комбинирование повышающим (K_y).

При K_y необходимое количество движений для возникновения производящей линии остается равным сумме движений комбинируемых классов.

Возможно обратное комбинирование от классов H^c , H^k и $П$ к классу E . Пусть в классах H^c , H^k и $П$ мгновенное значение $M_j \cap M$ состоит из конечного значения точек, т.е. является линейчатом. Тогда производящая линия будет возникать во времени в виде последовательного фиксирования объединения

$$A_j = \bigcup_{2 \leq x \leq n} f(x).$$

Таким образом, получим три других комбинированных подкласса: непрерывно единовременный при скольжении H^c*E , непрерывно единовременный при качении H^k*E и прерывисто единовременный $П*E$. Эти подклассы характеризуются более высокой производительностью, чем исходные классы H^c , H^k и $П$. Назовем полученное комбинирование повышающим (K_{II}). При K_{II} количество движений при возникновении производящей линии увеличивается до суммы движений комбинируемых классов.

Сочетая комбинированные подклассы возникновения производящих линий между собой и с основными геометрическими классами, получим все многообразие теоретически возможных подклассов образования поверхностей при формообразующей обработке. В таблице приведены результаты, упорядоченные по производительности исходных классов образования поверхностей. Приведено также количество движений формообразования для исходных классов и соответствующих им подклассов.

Классы и подклассы образования реальных поверхностей

Исходные классы	Количество движений	Комбинирование	Комбинированные подклассы	Количество движений
1	2	3	4	5
$П-П$	2 + 2	${}^oK_{II}$ ${}^H K_{II}$ ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$П*E - П$ $П - П*E$ $П*E - П*E$	2 + 2 2 + 2 2 + 2
$П-H^c$	2 + 1	${}^oK_{II}$ ${}^oK_{II}$ ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$П*E - H^c$ $П - H^c*E$ $П*E - H^c*E$	2 + 1 2 + 1 2 + 1
$П-H^k$	2 + 2	${}^oK_{II}$ ${}^H K_{II}$ ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$П*E - H^k$ $П - H^k*E$ $П*E - H^k*E$	2 + 2 2 + 2 2 + 2
$H^c-П$	1 + 2	${}^oK_{II}$ ${}^H K_{II}$ ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$H^c*E - П$ $H^c - П*E$ $H^c*E - П*E$	1 + 2 1 + 2 1 + 2
H^c-H^c	1 + 1	K_{II} K_{II} ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$H^c*E - H^c$ $H^c - H^c*E$ $H^c*E - H^c*E$	1 + 1 1 + 1 1 + 1
H^c-H^k	1 + 2	${}^oK_{II}$ ${}^H K_{II}$ ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$H^c*E - H^k$ $H^c - H^k*E$ $H^c*E - H^k*E$	1 + 2 1 + 2 1 + 2
$H^k-П$	2 + 2	${}^oK_{II}$ ${}^H K_{II}$ ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$H^k*E - П$ $H^k - П*E$ $H^k*E - П*E$	2 + 2 2 + 2 2 + 2
H^k-H^c	2 + 1	${}^oK_{II}$ ${}^H K_{II}$ ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$H^k*E - H^c$ $H^k - H^c*E$ $H^k*E - H^c*E$	2 + 1 2 + 1 2 + 1
H^k-H^k	2 + 2	${}^oK_{II}$ ${}^H K_{II}$ ${}^oK_{II} + {}^H K_{II}$	$H^k*E - H^k$ $H^k - H^k*E$ $H^k*E - H^k*E$	2 + 2 2 + 2 2 + 2
$E - П$	0 + 2	oK_y ${}^H K_{II}$ ${}^oK_y + {}^H K_{II}$	$E*П - П$ $E - П*E$ $E*П - П*E$	0 + 2 2 + 2 1 + 2

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
$E - H^c$	0 + 1	oK_y ${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$ oK_y ${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$ oK_y ${}^H K_{\Pi}$ ${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$	$E * H^c - \Pi$ $E * H^c - \Pi * E$ $E * H^k - \Pi$ $E * H^k - \Pi * E$ $E * \Pi - H^c$ $E - H^c * E$ $E * \Pi - H^c * E$	1 + 2 2 + 2 2 + 2 2 + 1 0 + 1 2 + 1 1 + 1
$E - H^k$	0 + 2	oK_y ${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$ oK_y ${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$ oK_y ${}^H K_{\Pi}$ ${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$ oK_y	$E - H^c * E$ $E * H^c - H^c * E$ $E * H^k - H^c$ $E * H^k - H^c * E$ $E * \Pi - H^k$ $E - H^k * E$ $E * \Pi - H^k * E$ $E * H^c - H^k$	1 + 1 2 + 1 2 + 1 2 + 2 0 + 2 2 + 2 1 + 2 1 + 2
$E - E$	0 + 0	${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$ oK_y ${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$ oK_y ${}^H K_{\Pi}$ ${}^oK_y + {}^H K_{\Pi}$ oK_y ${}^H K_y$ ${}^oK_y + {}^H K_y$ ${}^oK_y + {}^H K_y$ ${}^oK_y + {}^H K_y$ oK_y ${}^H K_y$ ${}^oK_y + {}^H K_y$ ${}^oK_y + {}^H K_y$ ${}^oK_y + {}^H K_y$ ${}^oK_y + {}^H K_y$ ${}^oK_y + {}^H K_y$	$E * H^c - H^k * E$ $E * H^k - H^k$ $E * H^k - H^c * E$ $E * \Pi - E$ $E - E * \Pi$ $E * \Pi - E * \Pi$ $E * H^c - E$ $E - E * H^c$ $E * H^c - E * H^c$ $E * \Pi - E * H^c$ $E * H^c - E * \Pi$ $E * H^k - E$ $E - E * H^k$ $E * H^k - E * H^k$ $E * \Pi - E * H^k$ $E * H^k - E * \Pi$ $E * H^c - E * H^k$ $E * H^k - E * H^c$	2 + 2 2 + 2 2 + 0 0 + 2 2 + 2 1 + 0 0 + 1 1 + 1 2 + 1 1 + 2 2 + 0 0 + 2 2 + 2 2 + 2 2 + 2 2 + 2 2 + 2 1 + 2 2 + 1 1 + 1

В приведенной таблице верхние индексы « o » и « H » у вида комбинирования K_y и K_{Π} обозначают, что в соответствующем подклассе воспроизведения поверхности комбинированием получают образующую или направляющую.

Примеры комбинированных подклассов формообразования реальных поверхностей. При точении широким резцом цилиндрической поверхности (рис. 1) характеристический образ 1 инструмента состоит из одного множества материальных точек $\{M_s\}_1$, мощность которого соответствует части направляющей 2 получаемой поверхности. Образующая 3 – окружность получаемой цилиндрической поверхности – воспроизводится непрерывно при скольжении (H^c) посредством вращения B_1 заготовки, а направляющая 2 – непрерывно одновременно ($H^c * E$) посредством поступательного движения Π_2 инструмента вдоль направляющей. Следовательно, подкласс воспроизведения цилиндрической поверхности ($H^c - H^c * E$). Приведенная схема получена из исходного класса ($H^c - H^c$) посредством управляющего комбинирования (K_y) путем изменения характеристического образа $\{1\}_1$ традиционного остро заточенного резца без изменения его конструкции. Однако темп воспроизведения направляющей может быть существенно выше. Теоретически темп воспроизведения направляющей возрастает пропорционально увеличению отношения мощностей характеристических образов $\{M_s\}_1$ и $\{1\}_1$ рассматриваемой схемы и ее прототипа. При этом критерий сложности [2] кинематической подсистемы комбинированного подкласса схемы формообразующей обработки, равный количеству формообразующих движений, не изменился.

На рисунке 2 показана схема способа точения цилиндрической поверхности остро заточенным резцом, у которого характеристический образ $P = \{1\}_1$. При обработке заготовке 1 сообщают движение кру-

говой подачи B_1 , а рецу 2 – движение скорости резания B_3 вокруг вертикальной оси 3, которой сообщают движение продольной подачи Π_2 параллельно оси заготовки. Прототипом данного способа обработки, как и в предыдущем примере, является классический способ обработки цилиндрической поверхности остро заточенным резцом.

Сообщение рецу дополнительного движения B_3 обеспечивает срезание стружки за каждый оборот реца в виде фигуры OAE , что равнозначно надежному стружкодроблению при обработке резанием. По существу этот эффект определяет синергизм рассматриваемого способа, признанного изобретением [3].

Надежное стружкодробление является следствием целенаправленного изменения структуры способа. При этом увеличивается его коэффициента сложности. Изменяется также основной класс воспроизведения поверхности на менее производительный $\Pi - \Pi$, чем по прототипу.

В рассматриваемом способе можно заменить рец резцовой головкой. Ее характеристический образ $\{1\}_k$, где k – число резцов головки. В итоге за счет использования инструмента с более высокой мощностью характеристического образа при прочих равных условиях существенно возрастает период размерной стойкости инструмента. Этот эффект, по существу, является суммой эффектов от использования определенного некоторого количества резцов. При этом класс образования поверхности и коэффициент сложности способа обработки не изменяются.

При использовании рассматриваемого способа из-за прерывистого характера резания на получаемой цилиндрической поверхности образуются гребни. Этот недостаток устраняется при использовании способа фрезоточения резцовой головкой [4]. По этому способу (рис. 3), как и по его прототипу, заготовке 1 сообщают движение B_1 , а резцовой головке 3, несущей рецы 2, – движения B_2 и Π_3 . Резцам 2 резцовой головки 3 (или одному из них) согласно [4] сообщают в зоне резания дополнительное перемещение Π_4 в радиальном направлении, связанное с ее вращением B_2 зависимостью

$$h = R (\sec \varphi - 1),$$

где h – путь радиального перемещения реца; R – радиус вершины реца при $h = 0$; φ – угол поворота реца от плоскости, нормальной оси заготовки.

В этом случае вершины режущих зубьев будут перемещаться на участке cd по прямолинейной образующей, получаемой номинальной поверхности. А на участках bd и ac будет осуществляться плавный переход от окружности к прямой и обратно. В итоге обеспечивается формообразование цилиндрической поверхности с той же точностью, что и при традиционном точении. Этот эффект определяет синергизм рассматриваемого способа формообразующей обработки, признанного изобретением.

В соответствии с рассмотренной выше методикой комбинирования классов образования воспроизводящих линий синергизм рассматриваемого способа является следствием целенаправленного изменения структуры способа при сохранении неизменным характеристического образа инструмента.

Изменяется посредством повышающего комбинирования основной класс воспроизведения поверхности на более производительный комбинированный подкласс $\Pi - \Pi^*H^c$. При этом увеличивается коэффициент сложности и изменяется функция способа.

На рисунке 4 показана схема способа обработки поверхностным пластическим деформированием цилиндрической поверхности. Инструмент – накатной ролик выполнен в форме спирали (пружины). Его характеристический образ представляет собой множество $\{M_s\}_1$, мощность которого значительно выше мощности образующей воспроизводимой поверхности – прямой линии, параллельной оси заготовки и равной длине этой поверхности. При такой конструкции инструмента его характеристический образ будет пересекаться с воспроизводящими линиями образующей (прямая линия) и направляющей (окружность) одновременно в нескольких точках, равнорасположенных вдоль образующей.

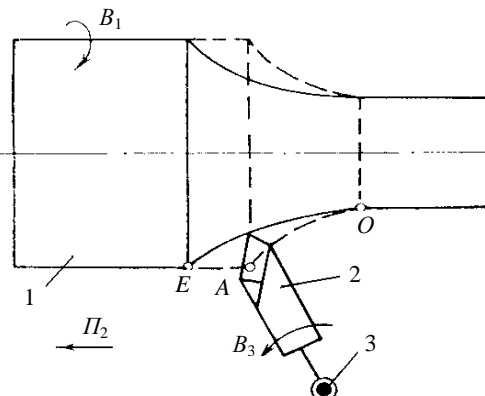


Рис. 2. Класс образования поверхности $\Pi - \Pi$

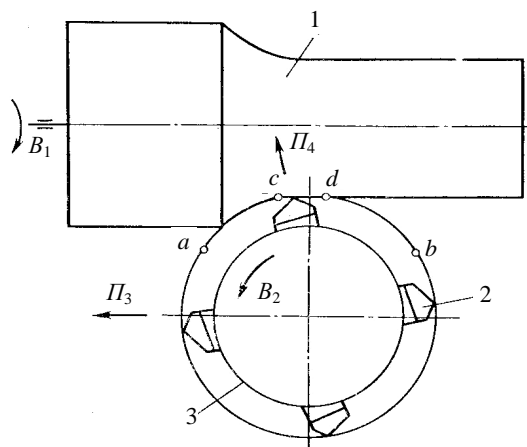


Рис. 3. Комбинированный подкласс $\Pi - \Pi^*H^c$ образования поверхности

При обработке заготовке 1 сообщают движение B_1 , а инструмент 2 подводят установочным движением Π_2 к ней. Вследствие силового контакта между инструментом и заготовкой инструмент получает вращательное движение B_3 обкатки. При этом характеристический образ инструмента отдельными последовательными участками непрерывно в перемещающихся точках контакта 3 пересекается с воспроизводящими линиями.

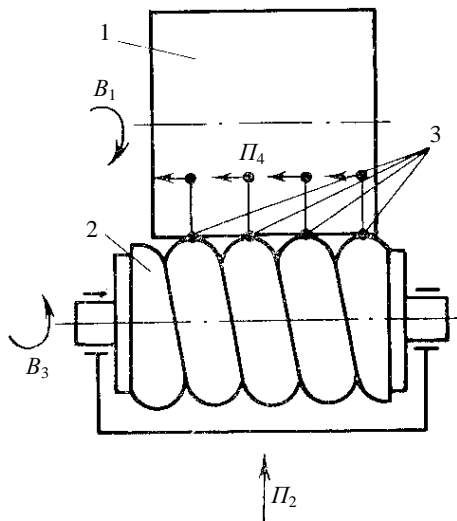


Рис. 4. Комбинированный подкласс $E^*H^c - H^c$ образования поверхности

но одновременно требуют введения дополнительного формообразующего движения Π_4 . В рассматриваемом случае такое движение получено за счет взаимодействия заготовки и инструмента.

На рисунке 5 показана схема способа газоплазменной лазерной наплавки [5], основанного на приращении вещества к заготовке. Функцию инструмента выполняет концентрированный источник энергии – луч лазера, расплавляющий газопорошковую смесь (прибавляемое вещество). По этому способу формообразующей обработки заготовку 1 устанавливают в шпиндель технологической машины по линии центров под смонтированными на суппорте источником лазерного луча 2 и питателем 3 газопорошковой смеси.

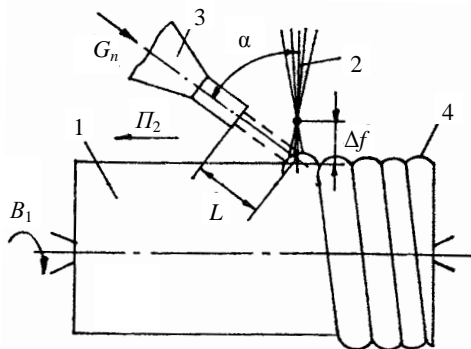


Рис. 5. Комбинированный подкласс $E - H^c * E$ образования поверхности

коэффициент Δf фокусировки луча и параметры G_n , L , α подачи газопорошковой смеси. Рекомендуемая по литературным источникам скорость формообразования наплавленной поверхности составляет 8,3...50 мм/с.

Зеркальное отображение луча лазера на наплавляемую заготовку представляет собой некоторую поверхность, воспроизводимую одновременно. Площадь этой поверхности зависит от коэффициента фокусировки Δf . Следовательно, мощность характеристического образа инструмента – луча лазера – есть декартово произведение

$$P = \{E \times E\}_1.$$

При $\Delta f = 0$ мощность характеристического образа луча лазера аналогична мощности характеристического образа остро заточенного резца $\{1\}_1$. Вероятно, в этом частном случае наплавка не имеет практического смысла.

Прообразом кинематической подсистемы анализируемого способа формообразующей обработки является классический способ нарезания резьбы фасонным резцом, у которого класс образования винтовой поверхности $E - H^c$. Следовательно, этот класс является исходным для рассматриваемого способа образования наплавленной поверхности при $\Delta f = 0$. При увеличении Δf мощность характеристического

образа луча лазера возрастает. Это создает условия для увеличения темпа движений V_1 и II_2 . В итоге при прочих равных условиях возрастает расход газопорошковой смеси и мощность излучения лазера. При этом класс воспроизведения образующей остается неизменным, а класс воспроизведения направляющей преобразуется, посредством K_y , в непрерывно единовременный при скольжении $H^c * E$.

Заключение. На основе системологии, являющейся составной частью общего системного анализа способов формообразующей обработки, предложена методика создания комбинированных подклассов получения реальных поверхностей на технологическом оборудовании. Выявлены виды комбинирования: повышающее, управляющее, смешанное. Приведены теоретически возможные подклассы получения реальных поверхностей. Рассмотрены примеры способов формообразующей обработки, полученных с использованием комбинирования основных классов образования реальных поверхностей. Приведенные примеры основаны на удалении части материала заготовки, на прибавлении материала к заготовке и на изменении формы заготовки с использованием инструмента как традиционного в виде твердого тела (резец, накатной ролик) так и в виде физического явления (луч лазера).

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов, Е.Г. Основы новых способов металлообработки / Е.Г. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1968.
2. Голембиевский, А.И. Основы системологии способов формообразующей обработки в машиностроении / А.И. Голембиевский. – Минск: Наука и техника, 1986.
3. Способ прерывистого точения: а. с. 228463 (СССР) / МКИ В 23В 1/00 / Ю.А. Новоселов // Открытия. Изобретения. – 1969. – № 31.
4. Способ обработки резанием: а. с. 854593 (СССР) / МКИ В 23В 1/00 / В.А. Данилов // Открытия. Изобретения. – 1981. – № 30.
5. Голембиевский, А.И. Анализ способов формообразующей обработки с позиций общей теории систем / А.И. Голембиевский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 13–46.

Поступила 05.01.2015

COMBINED SUBCLASS OF FORMATION REAL SURFACE AT THE FORMATIVE TREATMENT

A. GOLEMBIEVSKI

We consider the formalization of the characteristic image display tool for virtual geometric lines formed during the molding process machine processing. Identified theoretical education classes geometric lines – forming and directing used for playback of geometric surfaces represented as the trace left by a generator as it moves along the rail. The theoretical classes play of geometric surfaces obtained as a combination of the two lines – forming and directing from a variety of education classes geometric lines. The classes play real surfaces of a variety of theoretically possible classes. The technique of combining education classes reproducing lines between itself and on this basis identifies possible combination subclasses playing surfaces. The examples of combined subclasses play real surfaces with molding processing.

УДК 621.91.04

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПЛАСТИН РЕЖУЩИХ И БЛОКОВ РЕЗЦОВЫХ В БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТАХ

*д-р техн. наук, проф. Н.Н. ПОПОК; А.С. МАКСИМЧУК; С.А. ПОРТЯНКО
(Полоцкий государственный университет)*

Исследуется проблема совершенствования системы закрепления пластин режущих и блоков резцовых в блочно-модульных режущих инструментах. Предложена система закрепления режущей пластины в блочно-модульном режущем инструменте. Рассмотрены расчёты сил зажима режущей пластины и блока резцового. Представлены результаты экспериментальных исследований жёсткости механизмов закрепления, даны рекомендации по совершенствованию системы закрепления.

Введение. Надёжность сборных режущих инструментов в большой степени определяется надёжностью закрепления режущих пластин в корпусе. Существует множество конструкций зажимных механизмов, учитывающих условия работы режущих инструментов и особенности их изготовления [1; 2]. Наиболее полно существующие системы закрепления режущих пластин представлены в [3–5]. Эти системы отражают современные тенденции в конструировании режущих инструментов: высокая точность изготовления пластин режущих; закрытые и точно изготовленные пазы для их размещения; механизмы зажима пластин режущих с минимальным количеством конструктивных элементов, например, в виде винта или рычага. Реализация таких систем в условиях отечественного инструментального производства не всегда возможна, так как требует при изготовлении специального и точного оборудования, качественных комплектующих элементов. Поэтому актуальным является создание системы закрепления режущих пластин.

Конструктивные схемы закрепления режущих пластин и резцовых блоков. Предложена [6–8] система закрепления режущих пластин в блочно-модульном режущем инструменте (БМРИ) (рис. 1).

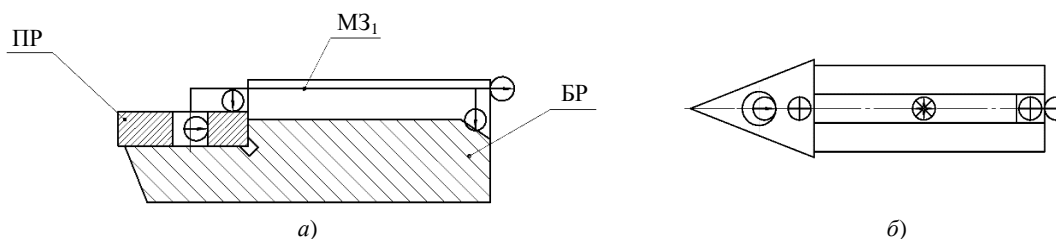


Рис. 1. Схема зажима пластины режущей:
а – главный вид; б – вид сверху;

– направление действия силы зажима ПР соответственно в плоскости чертежа, от нас;
 – направление перемещения вверх, вниз, вправо, влево; – запрет перемещения

Пластина режущая (ПР) в этом инструменте устанавливается в открытый поперечный паз блока резцового (БР). Модуль закрепления (МЗ₁) выполнен в виде «Т-образного» прихвата, «горизонтальная полка» которого одной частью вводится в отверстие ПР и прижимается к её передней поверхности, а другой частью входит в контакт со скосом БР. При этом «горизонтальная полка» прихвата устанавливается по посадке в открытый продольный паз БР. «Вертикальная полка» прихвата выполнена в виде винта, вворачиваемого в «горизонтальную полку» прихвата и устанавливаемого в овальное отверстие БР, а также скоса. При зажиме винта осуществляется одновременное перемещение прихвата в горизонтальном и вертикальном направлениях и прижим ПР по основанию, боковой поверхности и отверстию. Наиболее близким по технической сущности к предложенной системе является крепление типа D по ISO [3]. Однако в отличие от этого типа крепления в предлагаемой системе пазы выполнены открытыми, причём базируются пластина режущая и прихват. Надёжность закрепления ПР обеспечивается исключением перемещений ПР в радиальном, осевом и тангенциальном направлениях по отношению к обрабатываемой поверхности детали в процессе резания.

Система закрепления БР в модуле корпусном (МК) (рис. 2) также технологична при изготовлении и надёжна в эксплуатации. Блок резцовый устанавливается по цилиндрической поверхности в отверстие МК до упора по торцевой поверхности, где предварительно через другое отверстие в МК введён один из элементов (МЗ₂) – «сухарь». Затем вводится другой «сухарь» и оба «сухаря» стягиваются винтом, обеспечивая тем самым надёжный зажим БР между двумя «сухарями» и исключение перемещений БР во всех направлениях. При этом расположение «сухарей» относительно БР учитывает направление действующих на ПР

сил резания – силы зажима направлены по силам резания, что исключает возникновение зазоров в контактирующих поверхностях «сухарей» и корпуса блока резцового при колебании системы резания.

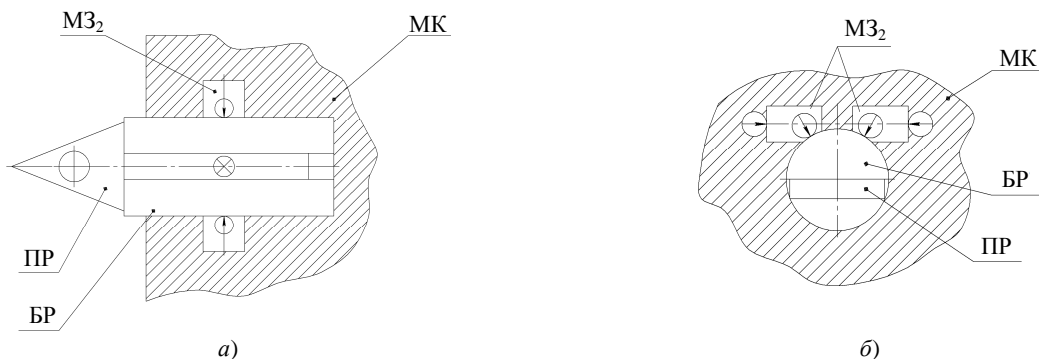


Рис. 2. Схема зажима блока резцового:
а – вид сверху в разрезе; б – поперечное сечение

Учитывая многоэлементность конструкций БМРИ и наличие «стыков» между модулями и блоками, не до конца изученным является вопрос надёжности этих сборных режущих инструментов. Такие показатели надёжности, как ремонтпригодность и сохраняемость, являющиеся для блочно-модульных режущих инструментов довольно высокими, так как унифицированные блоки и модули могут быть заменены в различных типах режущих инструментов. Конструкция БМРИ также является безотказной и долговечной благодаря тому, что может быть произведена своевременная «реновация» вышедших из строя блоков и модулей.

Однако безотказность и долговечность отдельных блоков и модулей в пределах возможного цикла их работы будут определяться точностью изготовления их деталей и жёсткостью сборочных узлов. Жёсткость БМРИ зависит прежде всего от жёсткости закрепления режущей пластины в блоке резцовом и резцового блока в модуле корпусном.

Расчёт сил зажима пластины режущей. Схему закрепления режущей пластины в резцовом блоке можно рассматривать как приспособление, состоящее из рычажного и винтового механизмов (рис. 3).

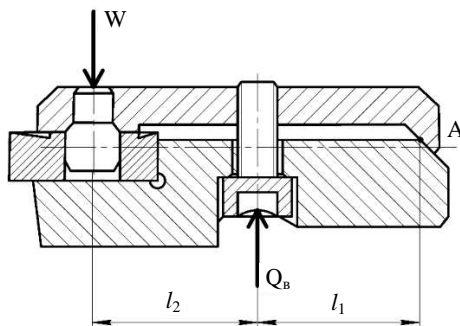


Рис. 3. Расчётная схема рычажного механизма в резцовом блоке

Для рычажного механизма сумма моментов относительно точки *A*

$$\sum M_A = W(l_1 + l_2) - Q_B \cdot l_1, \tag{1}$$

где *W* – сила закрепления режущей пластины; *l*₁ и *l*₂ – плечи рычажного механизма (принимаем *l*₁ = 17,5 мм, *l*₂ = 16,5 мм, исходя из конструкции резцового блока).

При стандартном ручном зажиме согласно рекомендациям [9; 10] усилие руки не должно превышать *Q*_с = 150 Н. При *l* = 0,6 м, принятом плече зажима винта, момент, приложенный к винту, будет равен

$$M_A = Q_B \cdot l = 90 \text{ Н}\cdot\text{м}. \tag{2}$$

Тогда сила затяжки винта, действующая вдоль резьбы, составит

$$Q_B = \frac{2M_B}{d_b \cdot \text{tg}(\alpha_p + \varphi_{pp})} = \frac{2 \cdot 90}{5 \text{tg}(4^\circ + 8,5^\circ)} = 16238 \text{ Н}, \tag{3}$$

где *d*_б – номинальный диаметр резьбы (принимаем для винта М5 *d*_б = 0,05 м); *α*_п – угол подъёма резьбы (*α*_п = 1...4°, принимаем *α*_п = 4°); *φ*_{пп} – приведенный угол трения (*φ*_{пп} = 5,75...8,5°, принимаем *φ*_{пп} = 8,5°).

Выразив из уравнения моментов (1) силу закрепления режущей пластины с учётом КПД рычажно-го механизма, равного 0,95, получим:

$$W = \frac{Q_b \cdot l_1}{l_1 + l_2} \cdot 0,95 = \frac{16238 \cdot 17,5}{17,5 + 16,5} \cdot 0,95 = 7940 \text{ Н.} \quad (4)$$

Сила резания, действующая на режущую пластину из твёрдого сплава, при точении конструкционной стали рассчитывается по формуле [11]:

$$P_{(z,y,x)} = 10C_p \cdot t^x s^y v^n k_p, \quad (5)$$

где C_p – поправочный коэффициент на обрабатываемый материал, выбираем $C_{pz} = 300$, $C_{py} = 243$, $C_{px} = 339$; x, y, n – показатели степени, выбираем: $x_{pz} = 1$, $y_{pz} = 0,75$, $n_{pz} = -0,15$; $x_{py} = 0,9$, $y_{py} = 0,6$, $n_{py} = -0,3$; $x_{px} = 1$, $y_{px} = 0,5$, $n_{px} = -0,4$; k_p – поправочный коэффициент на условия обработки:

$$k_p = k_{mp} k_{xp} k_{yp} k_{sp} k_{ep}, \quad (6)$$

принимая $k_p = 1$; t, s, v – соответственно глубина резания, подача и скорость резания (принимая $t = 1$ мм, $s = 0,3$ мм/об, $v = 150$ м/мин).

$$\text{Тогда} \quad P_z = 10 \cdot 300 \cdot 1^1 \cdot 0,3^{0,75} \cdot 150^{-0,15} \cdot 1 = 566 \text{ Н}; \quad (7)$$

$$P_y = 10 \cdot 243 \cdot 1^{0,9} \cdot 0,3^{0,6} \cdot 150^{-0,3} \cdot 1 = 270 \text{ Н}; \quad (8)$$

$$P_x = 10 \cdot 339 \cdot 1^1 \cdot 0,3^{0,5} \cdot 150^{-0,4} \cdot 1 = 251 \text{ Н.} \quad (9)$$

Сопоставляя полученные данные по действующим на пластину режущую тангенциальной, радиальной и осевой составляющих силы резания (формулы (7), (8)) с рассчитанным значением силы зажима режущей пластины (формула (4)), можно сделать вывод, что используемая в резцовом блоке конструкция механизма зажима обеспечивает надёжное (с 10...20-кратным превышением силы зажима над силой резания) закрепление режущей пластины.

Расчёт сил зажима блока резцового. Для зажима резцовых блоков в корпусных модулях используются прихватно-винтовой, клино-винтовой и двуклино-винтовой механизмы (рис. 4).

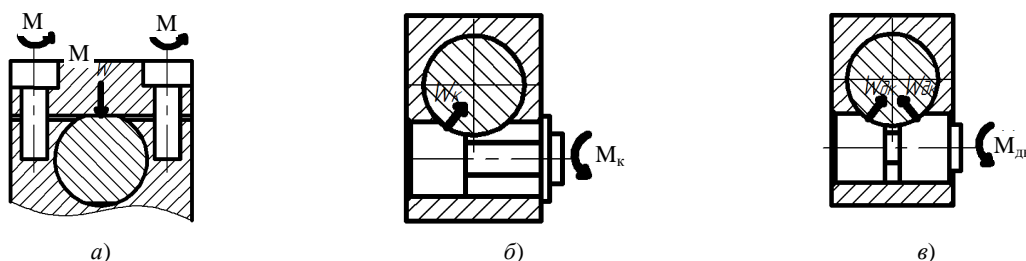


Рис. 4. Механизмы закрепления резцового блока в корпусе:
а – прихватно-винтовой; б – клино-винтовой; в – двуклино-винтовой

Расчёт усилия зажима винтовым механизмом производился по следующим формулам [12; 13]:

- для прихватно-винтового механизма

$$W_{np} = \frac{2M_{np}}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha_p + \varphi_{np})}; \quad (10)$$

- для клино-винтового механизма

$$W_{кл} = \frac{M_{кл}}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha_p + \varphi_{np}) \operatorname{tg}(\alpha_{кл} + \varphi_{кл})}; \quad (11)$$

- для двуклино-винтового механизма

$$W_{дк} = \frac{M_{дк}}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha_p + \varphi_{np}) \operatorname{tg}(\alpha_{кл} + \varphi_{кл})}, \quad (12)$$

где M_{np} , $M_{к}$ и $M_{дк}$ – момент затяжки винта соответственно прихватно-винтовым, клино-винтовым и двуклино-винтовым механизмами, Нм; r_{cp} – средний радиус резьбы (для винта М6 принимаем $r_{cp} = 2,7565$ мм); α_p – угол подъёма резьбы ($\alpha_p = 1...4^\circ$, принимаем $\alpha_p = 4^\circ$); φ_{np} – приведенный угол трения ($\varphi_{np} = 5^\circ 43'...8^\circ 30'$, при-

нимаем $\varphi_b = 8^\circ 30'$); $\alpha_{кл}$ – угол скоса клина (для обеспечения самоторможения $\alpha_{кл} = 11^\circ 23' \dots 17'$, принимаем $\alpha_{кл} = 17'$); $\varphi_{кл}$ – приведенный угол трения клина (принимаем $\varphi_{кл} = 8^\circ$).

Результаты расчётов зажимных механизмов представлены в виде графиков на рисунке 5.

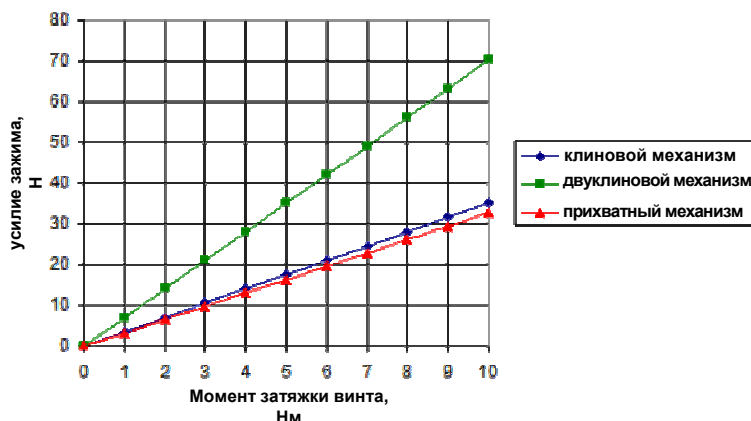


Рис. 5. Зависимость усилия зажима резцового блока от момента затяжки винта

Как видно из графиков, наилучшим зажимным механизмом является двуклиновой, обеспечивающий усилие зажима, равное 70 Н при значении момента затяжки винта, составляющем 10 Н·м. При таком же значении момента затяжки винта клиновой механизм обеспечивает усилие зажима, равное 35 Н, а прихватный – 32,8 Н. Расчет необходимого усилия зажима клиновым механизмом резцового блока исходя из усилия резания показывает следующее [14]:

$$W = \frac{k}{f} \cdot \sin \frac{\alpha_{кл}}{2} \cdot P_z = \frac{1,8}{0,25} \cdot \sin \frac{34^\circ}{2} \cdot 566 = 1182 \text{ Н}, \tag{13}$$

где k – коэффициент запаса ($k = 1,75 \dots 1,9$, принимаем $k = 1,8$); f – коэффициент трения ($f = 0,25$); α – угол скоса клина; P_z – сила резания.

Таким образом, клиновой механизм обеспечивает усилие зажима, примерно в 1,5...2 раза превышающее усилие резания (при условии самоторможения клина).

Экспериментальные исследования жёсткости резцовых блоков. При экспериментальной проверке полученных расчётных данных фиксировались величины перемещений режущей пластины и прихвата в различных точках при различных усилиях зажима винта (рис. 6). В частности, величины перемещений режущей пластины 5 в тангенциальном, радиальном и осевом направлениях измерялись соответственно индикаторами 1, 2, 3, а прихвата 6 – индикатором 4, усилие зажима винта 8 создавалось динамометрическим ключом 9.

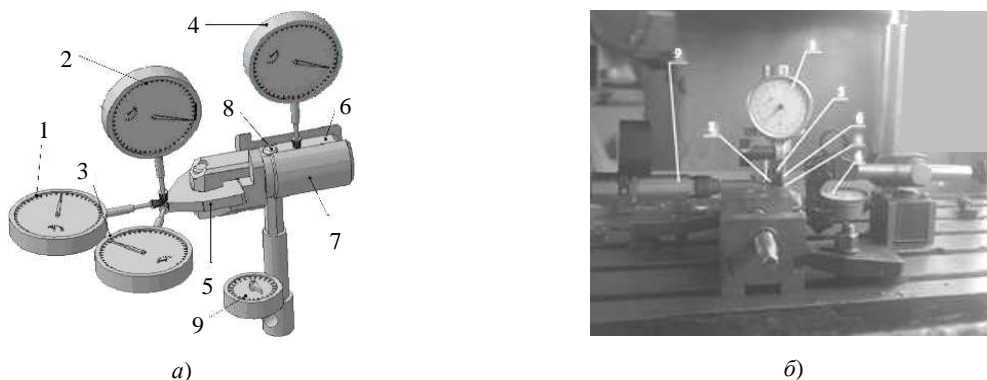


Рис. 6. 3D-модель (а) и экспериментальная установка (б) для измерения перемещений пластины режущей и прихвата: 1, 2, 3, 4 – индикаторы часового типа; 5 – пластина режущая; 6 – прихват; 7 – блок резцовый; 8 – винт зажимной; 9 – динамометрический ключ

Результаты измерений перемещений пластины режущей и прихвата в блоке резцовом представлены в виде графиков на рисунке 7, из которого видно, что величины перемещений пластины режущей незначительные и минимальны в радиальном направлении. При нагрузке, составляющей примерно в 2 Н·м, перемещений не наблюдается, что свидетельствует о выборе зазоров между пластиной, боковыми стенками паза и винтом. Прихват совершает более значительные перемещения по сравнению с пластиной режущей, что требует изменения его конструкции.

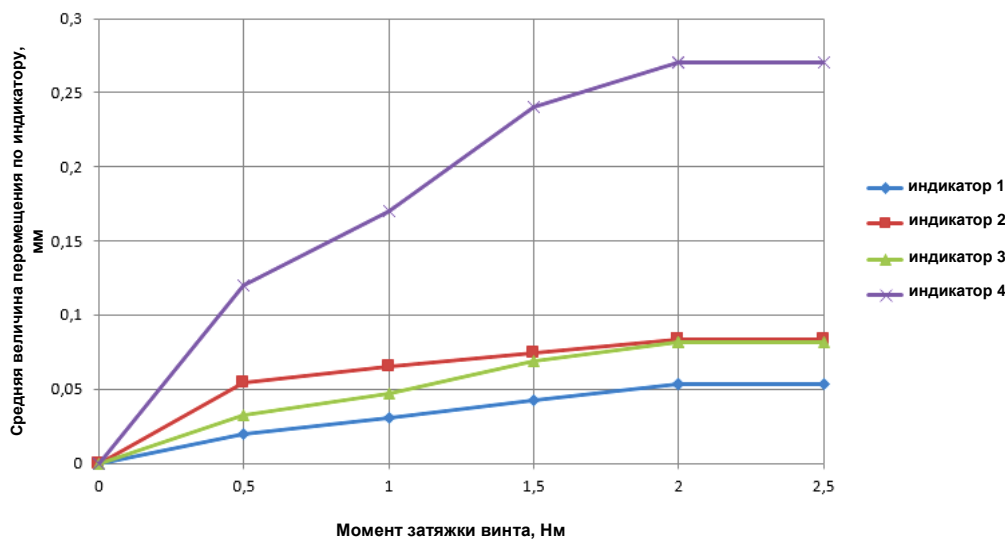


Рис. 7. Зависимость величины перемещений пластины режущей и прихвата в блоке резцовом от величины нагрузки на динамометрическом ключе

С учётом полученных значений перемещений и прикладываемых к винту усилий были произведены расчёты жёсткости конструкции блока резцового как отношение величины зажима к величине перемещения элемента. Результаты экспериментов и расчётов представлены на рисунке 8.

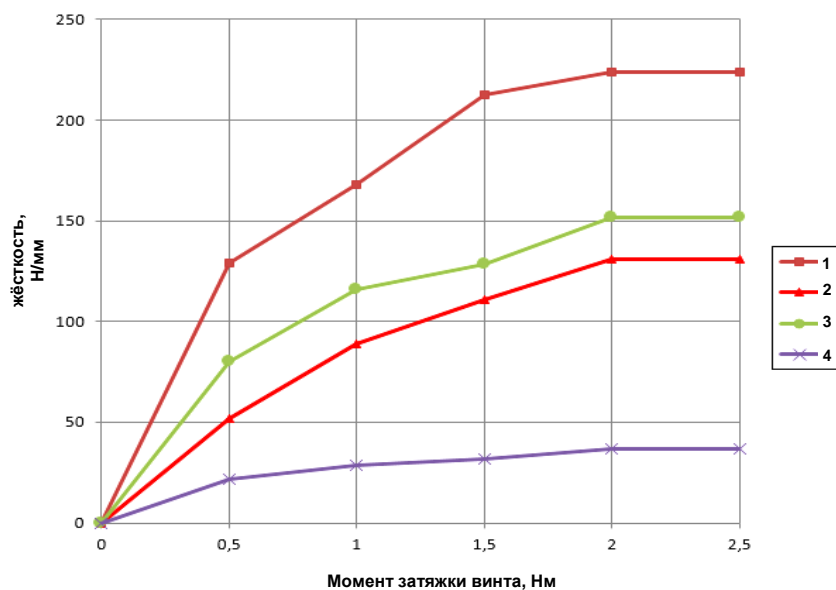


Рис. 8. Зависимость жёсткости элементов конструкции блока резцового от момента затяжки винта: 1, 2 и 3 – режущей пластины соответственно в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях; 4 – прихвата

Как видно из графиков, при определённом моменте затяжки винта (в пределах 1...2 Н·м) максимальную жёсткость закрепления имеет пластина режущая, минимальную – прихват.

Надёжность закрепления блока резцового в корпусном модуле экспериментально проверялась при его зажиме прихватным (рис. 9, а), одно- и двуклиновыми (рис. 9, б) механизмами с приложением к блоку определённого момента, имитирующего момент силы резания. В эксперименте последовательно фиксировался момент затяжки и значение приложенного момента, при котором наблюдался проворот («страгивание») блока резцового. Результаты эксперимента представлены в виде графиков на рисунке 10. Из графиков видно, что момент проворота («страгивания») резцового блока в зажимном механизме увеличивается по мере увеличения значения момента затяжки винта зажимного механизма, и при достижении максимального значения момента затяжки смещение резцового блока в механизме зажима не происходит. Причём в двуклиновом механизме надёжное закрепление блока резцового наблюдается при моменте затяжки 5 Н·м, в то время как в клиновом и прихватном – только при 12,5 Н·м и 15 Н·м соответственно.



Рис. 9. Экспериментальные установки для исследования зажимных механизмов: *a* – прихватный; *b* – клиновой и двуклиновой

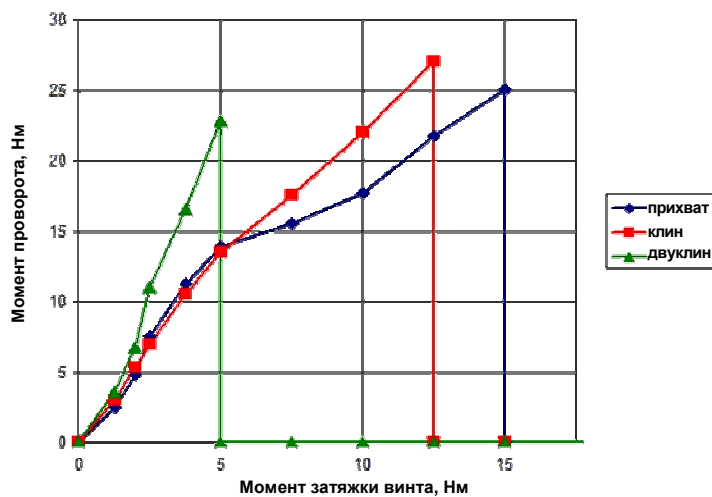


Рис. 10. Зависимость момента проворота блока резцового от момента затяжки винта

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных моментов проворота резцовых блоков показывает, что расхождение их значений находится в пределах 15...25 % (рис. 11).

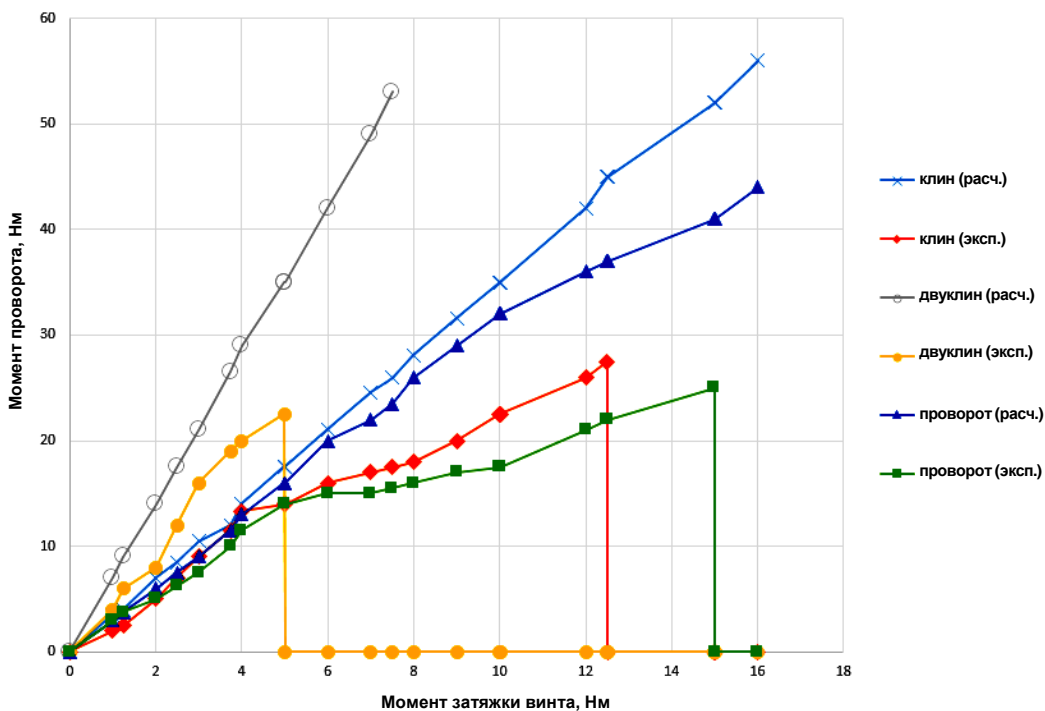


Рис. 11. Сопоставление результатов экспериментальных исследований и расчётных данных моментов проворота резцового блока

Таким образом, расчёты и результаты эксперимента подтверждают работоспособность конструкций блочно-модульных режущих инструментов.

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

- выбранные конструктивные параметры механизма зажима режущей пластины обеспечивают надёжное её закрепление при 10...20-кратном превышении силы зажима над силой резания;
- двуклиновой механизм с выбранными параметрами обеспечивает зажим блока с усилием, превышающим усилие резания не менее чем в 1,5 раза;
- из рассмотренных механизмов зажима блока резцового наилучшим является двуклиновой механизм, так как по сравнению с клиновым и прихватным механизмами он обеспечивает в 2...3 раза больший момент затяжки;
- результаты расчёта и полученные экспериментальные данные моментов проворота резцовых блоков показывают, что расхождения их значений находятся в пределах 15...25 %, что подтверждает достоверность предложенных методик исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев [и др.]; под общ. ред. И.А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с.
2. Сборный твёрдосплавный инструмент / Г.Л. Хаеа [и др.]; под общ. ред. Г.Л. Хаеа. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
3. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Ч. 1. Термины и система обозначения режущих пластин, державок и модулей // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 3. – С. 71–81.
4. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Ч. 2. Механизмы крепления // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 11–19.
5. Попок, Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Ч. 3. Инструментальные системы для многоцелевой обработки // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 19–37.
6. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. наука, 2014. – 316 с.
7. Способ установки сменной режущей пластины в режущем инструменте: пат. по заявке № а2011025 / Попок Н.Н., Терентьев В.А., Хмельницкий Р.С., Сидикевич А.В., Сопиков И.Я.; заявл. 2011.01.06; выдано 2014.12.12.
8. Режущий инструмент: пат. по заявке № а2011026 / Попок Н.Н., Терентьев В.А., Хмельницкий Р.С., Сидикевич А.В., Сопиков И.Я.; заявл. 2011.01.06; выдано 2014.12.12.
9. Станочные приспособления [Электронный ресурс] // Производство и машиностроение. – Режим доступа: <http://poliformdeta.com/stanochnye-prisposobleniya>. – Дата доступа: 16.07.2014.
10. Приспособления станочные. Требования безопасности: ГОСТ 12.2.029. – Введ. 01.08.1989. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 15 с.
11. Косилова, А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
12. Фаскиев, Р.С. Проектирование приспособлений: учеб. пособие / Р.С. Фаскиев, Е.В. Бондаренко. – Оренбург: ГОУ «ОГУ», 2006. – 178 с.
13. Ансеров, М.А. Приспособления для металлорежущих станков / М.А. Ансеров. – Изд. 4-е, исправл. и доп. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1960. – 638 с.
14. Антонюк, В.Е. В помощь молодому конструктору станочных приспособлений / В.Е. Антонюк. – Минск: Беларусь, 1975. – 351 с.

Поступила 29.01.2015

IMPROVING OF FIXING SYSTEM OF CUTTING INSERTS AND CUTTING BLOCKS IN BLOCK-MODULAR CUTTING TOOLS

N. POPOK, A. MAKSIMCHUK, S. PORTYANKO

The problem of improving the system of fixing the cutting plates and blocks in the incisal modular cutting tools is investigated. The system of fixing the cutting insert in modular cutting tool is proposed. The calculations of forces clamp the insert and block incisive are given. The results of experimental studies of fixed-rigidity mechanisms of and recommendations for improving the system secure are presented.

УДК 534.121.1

К ВОПРОСУ ВЫЧИСЛЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И СОБСТВЕННЫХ ФОРМ СВОБОДНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИНОК

канд. техн. наук, доц. Л.С. ТУРИЩЕВ
(Полоцкий государственный университет)

Задача отыскания собственных частот и собственных форм свободных колебаний свободной прямоугольной изотропной пластинки является одной из трудных задач и имеет как теоретическое, так и прикладное значение. Математически задача заключается в отыскании собственных чисел и собственных функций уравнения свободных колебаний пластинки, решение которого должно подчиняться только динамическим граничным условиям. Имеющие большое распространение вариационные методы позволяют для такой задачи определять практически только низшие собственные частоты и соответствующие им собственные формы свободных колебаний. В связи с этим представляет интерес метод Эдмана, который позволяет для рассматриваемой задачи сравнительно просто вычислять собственные числа и собственные функции любого номера. Однако в методе Эдмана встречаются скрытые особенности, не исследованные автором метода. В данной работе приводятся результаты исследования этих особенностей и обсуждаются пути их учета при численной реализации метода.

Важной задачей, имеющей теоретическое и прикладное значение, является задача получения собственных частот и собственных форм свободных колебаний прямоугольной изотропной пластинки с произвольной схемой опирания. Математически задача заключается в нахождении собственных чисел и собственных функций уравнения

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - k^4 w = 0. \quad (1)$$

Решение этого уравнения осуществляется при некоторых граничных условиях

$$u_i(w) = 0, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (2)$$

Известно, что задача (1), (2) является наиболее трудной в случае свободной прямоугольной пластинки. Трудность решения такой задачи заключается в необходимости подчинения решения уравнения (1) только динамическим граничным условиям следующего вида:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|_{x=0,a} &= 0; \\ \left. \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right|_{y=0,b} &= 0; \\ \left. \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} \right|_{x=0,a} &= 0; \\ \left. \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right|_{y=0,b} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Наибольшее распространение для решения задачи (1), (3) получили вариационные методы. Однако следует заметить, что, несмотря на их универсальность, они удобны только для определения низших собственных частот. В связи с этим представляет интерес вычисление собственных частот и собственных форм свободных колебаний свободной прямоугольной пластинки методом Эдмана [1]. Это объясняется тем, что вычисление собственной частоты любого номера не связано с составлением и раскрытием определителя, а построение соответствующей ей собственной формы производится по относительно несложной одночленной формуле. Поэтому метод Эдмана сравнительно просто численно реализуется с помощью ЭВМ.

Суть метода Эдмана заключается в следующем [1]. Решение дифференциального уравнения (1) ищется в виде

$$w \approx cu(\lambda; x)v(\mu; y), \quad (4)$$

где c – произвольная постоянная; u, v – некоторые неизвестные функции от x и y , соответственно четыре раза непрерывно дифференцируемые и содержащие соответственно неизвестные параметры λ и μ .

Подставляя выражение (4) в уравнение (1) и применяя формулу Галеркина, после всех преобразований приходим к следующему выражению для нахождения собственных чисел:

$$k^4 = B_\lambda + \frac{2}{\varepsilon^2} A_\lambda A_\mu + \frac{1}{\varepsilon^4} B_\mu, \quad (5)$$

$$A_\lambda = \frac{\int u'' u dx}{\int u^2 dx}; \quad B_\lambda = \frac{\int u^{IV} u dx}{\int u^2 dx};$$

$$A_\mu = \frac{\int v'' v dy}{\int v^2 dy}; \quad B_\mu = \frac{\int v^{IV} v dy}{\int v^2 dy};$$

$$\varepsilon = \frac{b}{a}.$$

Следовательно, если входящие в условия (3) функции u и v будут известны, то по формуле (5) можно определять для уравнения (1) собственные числа любого номера.

Для нахождения функций u и v выражение (4) подставляется в уравнение (1) и, считая поочередно функции u и v неизменными, дважды применяется формула Галеркина. После всех преобразований получаются два обыкновенных однородных дифференциальных уравнения 4-го порядка:

$$u^{IV} + 2A_\mu u'' + \left(B_\mu - \frac{1}{a^4} k^4 \right) u = 0; \quad (6)$$

$$v^{IV} + 2A_\lambda v'' + \left(B_\lambda - \frac{1}{a^4} k^4 \right) v = 0. \quad (7)$$

Решение уравнений (6) и (7) ищется в виде

$$u(x) = a_1 ch\lambda_1 x + a_2 sh\lambda_1 x + a_3 ch\lambda_2 x + a_4 sh\lambda_2 x; \quad (8)$$

$$v(y) = b_1 ch\mu_1 y + b_2 sh\mu_1 y + b_3 ch\mu_2 y + b_4 sh\mu_2 y, \quad (9)$$

где

$$a_i, b_i \quad (i = 1, \dots, n)$$

есть произвольные постоянные, определяемые из граничных условий (3).

Таким образом, каждая из функций u и v удовлетворяет граничным условиям только на двух противоположных сторонах.

Выражения (8) и (9) с учетом полученных значений a_i, b_i принимают представленный ниже вид.

Симметричные функции u_m и v_n ($m, n = 2, 4, 6 \dots$):

$$u_m = \frac{ch\bar{\lambda}_1 \xi}{ch\bar{\lambda}_1/2} - \gamma_\lambda \frac{ch\bar{\lambda}_2 \xi}{ch\bar{\lambda}_2/2}; \quad (10)$$

$$v_n = \frac{ch\bar{\mu}_1 \eta}{ch\bar{\mu}_1/2} - \gamma_\mu \frac{ch\bar{\mu}_2 \eta}{ch\bar{\mu}_2/2}, \quad (11)$$

где

$$\gamma_\lambda = \frac{2\bar{\lambda}_1^2 - \nu(\bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2)}{2\bar{\lambda}_2^2 - \nu(\bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2)};$$

$$\gamma_\mu = \frac{2\bar{\mu}_1^2 - \nu(\bar{\mu}_1^2 + \bar{\mu}_2^2)}{2\bar{\mu}_2^2 - \nu(\bar{\mu}_1^2 + \bar{\mu}_2^2)};$$

$$\bar{\lambda}_1 = \lambda_1 a; \quad \bar{\lambda}_2 = \lambda_2 a;$$

$$\bar{\mu}_1 = \mu_1 b; \quad \bar{\mu}_2 = \mu_2 b;$$

$$\xi = \frac{x}{a}; \quad \eta = \frac{y}{b}.$$

Входящие в выражения (10) и (11) аргументы λ_i и μ_i ($i = 1, 2$) определяются из аргументных уравнений:

$$th \frac{\bar{\lambda}_1}{2} = \frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} \gamma_\lambda^2 + th \frac{\bar{\lambda}_2}{2}; \quad (12)$$

$$th \frac{\bar{\mu}_1}{2} = \frac{\bar{\mu}_2}{\bar{\mu}_1} \gamma_\mu^2 + th \frac{\bar{\mu}_2}{2}. \quad (13)$$

Антисимметричные функции u_m и v_n ($m, n = 1, 3, 5 \dots$):

$$u_m = \frac{sh \bar{\lambda}_1 \xi}{sh \bar{\lambda}_1 / 2} - \gamma_\lambda \frac{sh \bar{\lambda}_2 \xi}{sh \bar{\lambda}_2 / 2}; \quad (14)$$

$$v_n = \frac{sh \bar{\mu}_1 \eta}{sh \bar{\mu}_1 / 2} - \gamma_\mu \frac{sh \bar{\mu}_2 \eta}{sh \bar{\mu}_2 / 2}. \quad (15)$$

Соответствующие им аргументные уравнения имеют следующий вид:

$$cth \frac{\bar{\lambda}_1}{2} = \frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1} \gamma_\lambda^2 + cth \frac{\bar{\lambda}_2}{2}; \quad (16)$$

$$cth \frac{\bar{\mu}_1}{2} = \frac{\bar{\mu}_2}{\bar{\mu}_1} \gamma_\mu^2 + cth \frac{\bar{\mu}_2}{2}. \quad (17)$$

В формулах (10), (11), (14), (16) m и n обозначают число узловых точек. При заданных m и n решение аргументных уравнений (12), (13), (16) и (17) осуществляется следующим образом. Первоначальные значения аргументов $\bar{\lambda}_2$, $\bar{\mu}_2$ задаются произвольно из интервалов

$$(m - 0,5)\pi < \bar{\lambda}_2 < m\pi; \quad (18)$$

$$(n - 0,5)\pi < \bar{\mu}_2 < n\pi. \quad (19)$$

Значения соответствующих аргументов $\bar{\lambda}_1$, $\bar{\mu}_1$ определяются решением уравнений (12), (13) при ($m, n = 2, 4, 6 \dots$) и решением уравнений (16), (17) при ($m, n = 1, 3, 5 \dots$).

Последующее решение задачи заключается в поэтапном «исправлении» полученных функций u и v последовательным подчинением их дополнительным граничным условиям:

$$\Psi_1 = F_\lambda + \frac{(1-\nu)}{\epsilon^2} (A_\lambda + G_\lambda)(A_\mu - G_\mu) = 0; \quad (20)$$

$$\Psi_2 = F_\mu + \frac{(1-\nu)}{\epsilon^2} (A_\mu + G_\mu)(A_\lambda - G_\lambda) = 0, \quad (21)$$

где

$$F_\lambda = \frac{u'''u - u''u'}{\int u^2 dx} \Big|_{-0,5a}^{+0,5a};$$

$$F_\mu = \frac{v'''v - v''v'}{\int v^2 dx} \Big|_{-0,5b}^{+0,5b};$$

$$G_\lambda = -A_\lambda + \frac{u'u}{\int u^2 dx} \Big|_{-0,5a}^{+0,5a};$$

$$G_\mu = -A_\mu + \frac{v'v}{\int v^2 dx} \Big|_{-0,5b}^{+0,5b}.$$

Граничные условия (20), (21) выражают собой равенство нулю полной работы внутренних сил на каждой грани пластинки.

Сохраняя неизменными параметры $\bar{\lambda}_1, \bar{\lambda}_2$, согласно выражениям (13), (17), (19) вычисляем параметры $\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2$, удовлетворяющие условию (20). Тем самым подбирается соответствующая функция v , удовлетворяющая первому дополнительному граничному условию.

Сохраняя неизменными вычисленные параметры $\bar{\mu}_1, \bar{\mu}_2$, согласно выражениям (12), (16), (18) определяем параметры, удовлетворяющие условию (21). Тем самым подбирается соответствующая функция u , удовлетворяющая второму дополнительному граничному условию.

Дальше вычислительная процедура повторяется до получения решения требуемой точности. Достоинством метода является то, что при решении инженерных задач он позволяет с удовлетворительной точностью ограничиться одним шагом.

Однако при численной реализации метода Эдмана согласно описанному алгоритму выявляются скрытые особенности, не исследованные автором [1]. Их суть заключается в следующем.

При решении аргументного уравнения (12), соответствующего четным номерам m , относительно $\bar{\lambda}_1$ в зависимости от значений $\bar{\lambda}_2$ могут возникать три качественно различные ситуации. Внутри интервала (18) существует особое значение $\bar{\lambda}_2$, которое назовем критическим и обозначим $\bar{\lambda}_{2кр}$.

Если $\bar{\lambda}_2$ принадлежит интервалу

$$(m-0,5)\pi < \bar{\lambda}_2 < \bar{\lambda}_{2кр},$$

уравнение (12) имеет три корня $\bar{\lambda}_1^1, \bar{\lambda}_1^2, \bar{\lambda}_1^3$.

Если $\bar{\lambda}_2$ принимает значение

$$\bar{\lambda}_2 = \bar{\lambda}_{2кр},$$

уравнение (12) имеет два корня, и один из них кратный.

Если $\bar{\lambda}_2$ принадлежит интервалу

$$\bar{\lambda}_{2кр} < \bar{\lambda}_2 < m\pi,$$

уравнение (12) имеет один корень $\bar{\lambda}_1^1$.

Во всех трех случаях первый корень не удовлетворяет физическому смыслу задачи.

При решении аргументного уравнения (16), соответствующего нечетным номерам m , относительно $\bar{\lambda}_1$ в зависимости от значений $\bar{\lambda}_2$ могут возникать следующие качественно различные ситуации.

Если $\bar{\lambda}_2$ принадлежит интервалу

$$(m-0,5)\pi < \bar{\lambda}_2 < \bar{\lambda}_{2кр},$$

уравнение (16) имеет три корня $\bar{\lambda}_1^1, \bar{\lambda}_1^2$.

Если $\bar{\lambda}_2$ принимает значение

$$\bar{\lambda}_2 = \bar{\lambda}_{2кр},$$

уравнение (16) имеет один кратный корень.

Если $\bar{\lambda}_2$ принадлежит интервалу

$$\bar{\lambda}_{2кр} < \bar{\lambda}_2 < m\pi,$$

уравнение (16) не имеет корней.

Выявленные особенности относительно числа решений аргументных уравнений (12), (16) необходимо учитывать при удовлетворении приближенному граничному условию (20). При значениях $\bar{\lambda}_2$, принадлежащих интервалу (18), в граничном условии (20) первое слагаемое положительное, а второе – отрицательное. Поэтому удовлетворение условия (20) возможно, если равны модули этих слагаемых.

При вычислении значений функции F_λ , являющейся первым слагаемым в левой части условия (20), необходимо учитывать, что эта функция двузначная и имеет вертикальную касательную, если $\bar{\lambda}_2 = \bar{\lambda}_{2кр}$, о чем свидетельствует рисунок 1.

Для четных номеров m при вычислении значений функции F_λ , принадлежащих нижней ветви, берется второй корень аргументного уравнения (12), а при вычислении значений, принадлежащих верхней ветви, – третий корень (рис. 1, а).

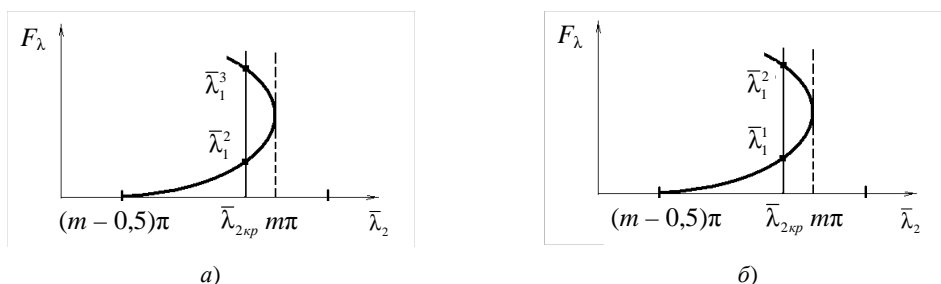


Рис. 1. Особенности вычисления функции F_λ

Для нечетных номеров m при вычислении значений функции F_λ , принадлежащих нижней ветви, берется первый корень аргументного уравнения (16), а при вычислении значений, принадлежащих верхней ветви, – второй корень (рис. 1, б). Поэтому для удовлетворения граничному условию (20) с учетом особенностей поведения функции F_λ первоначально аргумент $\bar{\lambda}_2$ нужно увеличивать до значения $\bar{\lambda}_{2кр}$, а затем уменьшать (рис. 2).

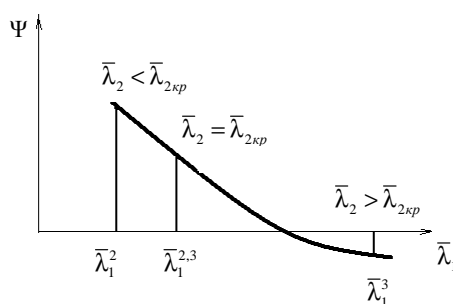


Рис. 2. Особенности вычисления функции Ψ

Таким образом, все вышеизложенное в отношении аргументов $\bar{\lambda}_1$, $\bar{\lambda}_2$ и граничного условия (20) справедливо для аргументов $\bar{\mu}_1$, $\bar{\mu}_2$ и граничного условия (21).

ЛИТЕРАТУРА

1. Odman, S.T.A. Studies of Coundary value problems / S.T.A. Odman. Part II. Characteristic functions of rectangular plates. Sv. forsk. inst. for com. ach.b Bet. – Stockholm, 1955. – 283 p.

Поступила 18.12.2014

THE QUESTION OF CALCULATING EIGENFREQUENCIES AND MODES OF FREE RECTANGULAR PLATES

L. TURISHCHEV

The problem of determining the natural frequencies and natural modes of free oscillations of the free rectangular isotropic plate is one of the difficult tasks and has both theoretical and practical importance. Mathematically, the problem is to find the eigenvalues and eigenfunctions of the free oscillations of the plate, whose decision shall be subject only to the dynamic boundary conditions. Having widespread variational methods allow for this to determine practically only the lowest natural frequencies and the corresponding own forms of free oscillations. In this connection it is interesting to Edman method, which allows for this problem is relatively easy to calculate the eigenvalues and eigenfunctions of any room. However, in the method of Edman found hidden features not examined by the author of the method. The article presents the results of a study of these issues and discuss ways to incorporate them into the numerical implementation of the method.

УДК 621:677.024.5

СИНТЕЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПРИВОДА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА ТКАЦКИХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНКАХ

канд. техн. наук, доц. **О.Я. СЕДЕЛЬ**
(Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина)

Исследуется актуальная проблема при работе на современных ткацких станках – управление технологическим процессом. Показано, что обеспечение нормального и правильного процесса достигается путем регулирования натяжения подачи нитей основы в зону формирования тканей с помощью механизма дифференциального регулятора и датчика контроля натяжения нитей основы на станке. Представлен синтез и оптимизация параметров дифференциального привода с учетом диапазона регулируемых скоростей ведомого звена регулятора, связанного с навоем ткацкого станка.

Введение. Технологический процесс образования ткани на ткацких станках характеризуется процессом подачи нитей основы и отвода готовой ткани. Программа образования ткани определяется плотностью ткани по утку и задается механизмом товарного регулятора.

В задачу регулятора подачи нитей основы входит слежение за величиной заправочного натяжения «основа – ткань» и подача в зону формирования ткани постоянного элемента нитей основы на выработку элемента ткани за каждый оборот главного вала станка.

Существующая система регулирования натяжения и подачи нитей основы состоит из скала и кулисного механизма, которые производят лишь регулирование статической составляющей натяжения основы. Ввиду быстродействия протекающих процессов при образовании ткани существующая система, обладая большой инерционностью, не успевает следить и обрабатывать возмущения от динамических составляющих натяжения основы при прибое уточной нити к опущке ткани. Точность регулирования натяжения основы существующих систем составляет 30...35 % от заправочного уровня.

С целью увеличения точности регулирования натяжения нитей основы и процесса ткачества используется дифференциальный механизм регулирования натяжения и подачи основы, состоящий из дифференциального механизма с управляемым электродвигателем, электронного датчика контроля натяжения нитей основы и существующего червячного механизма, связанного с главным валом станка.

Основная часть. Регулирование процесса ткачества обеспечивается за счет регулирования скорости вращения червяка путем суммирования двух скоростей: скорости от главного вала станка и скорости от управляемого электродвигателя, связанного с дифференциальным механизмом. Угловая скорость главного вала станка является постоянной величиной, в то время как скорость управляемого электродвигателя, связанного с датчиком контроля натяжения основы, будет переменной величиной.

Скорость электродвигателя может увеличиваться или уменьшаться от начального значения в зависимости от изменения заправочного натяжения нитей основы. Суммирование этих двух скоростей в каждый рассматриваемый момент времени позволяет регулировать угловую скорость червяка и навоя с нитями основы и обеспечивать подачу постоянного элемента нитей с навоя по мере срабатывания основы с навоя с большего диаметра до минимального, поддерживая таким образом постоянное натяжение основы до полного сматывания нитей из навоя.

На рисунке 1 представлены структурные схемы дифференциальных механизмов, которые могут быть использованы в регуляторе подачи нитей основы.

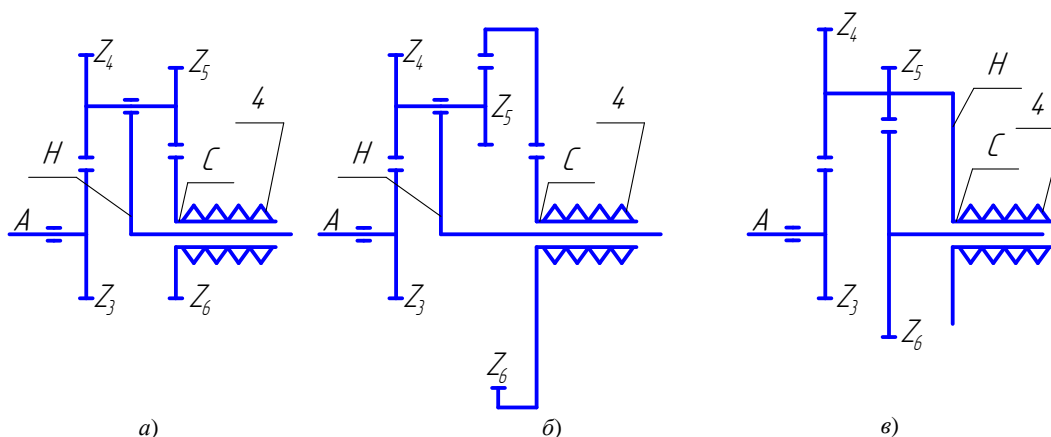


Рис. 1. Схемы дифференциальных механизмов

Обозначим центральные колёса дифференциального механизма через A и C , а водило – через H . В данных структурах дифференциальных механизмов постоянную скорость будут иметь водило H (рис. 1, а, б) или центральное колесо z_6 (рис. 1, в), которые связаны с главным валом ткацкого станка.

Учтем также, что $n_n = n_{н.в.}$, тогда скорость вращения вала C при $i_0 > 0$ будет равна [2]:

$$n_C = i_0 n_A + n_H(1 - i_0), \quad (1)$$

а при $i_0 < 0$

$$n_C = n_H(1 + i_0) - i_0 n_A, \quad (2)$$

где $i_0 = i_{CA}^H = z_3 z_5 / z_4 z_6$ – передаточное отношение от вала C к валу A при остановленном водиле H .

Следует заметить, что в случае равенства скорости главного вала станка и скорости вращения червяка 4 ($n_{ч.р.}$) выполняется условие: $n_n = n_C = n_A$. Это имеет место как для встречного, так и для попутного вращения вала A и водила H .

Определим влияние передаточного отношения i_0 на диапазон изменения скорости вращения вала A для обеспечения требуемых технологическим процессом переменных скоростей вращения червяка 4.

С увеличением передаточного отношения i_0 уменьшается приведенный к валу регулируемого электродвигателя момент инерции подвижных деталей кинематической цепи и момент от сил сопротивления M_C .

Выразим скорость n_A из зависимостей (1), (2) и определим необходимые диапазоны ее изменения для различных значений i_0 .

Скорость вращения вала станка $n_{н.в.}$ принимаем равной 240 мин^{-1} .

Требуемый диапазон изменения скорости вала червяка, равный $n_{ч.р.}$, составляет $189 \dots 3,8 \text{ мин}^{-1}$.

По расчетным значениям скоростей электродвигателя и диапазона изменения скоростей навоя построены графики для положительных и отрицательных значений i_0 , которые представлены на рисунке 2.

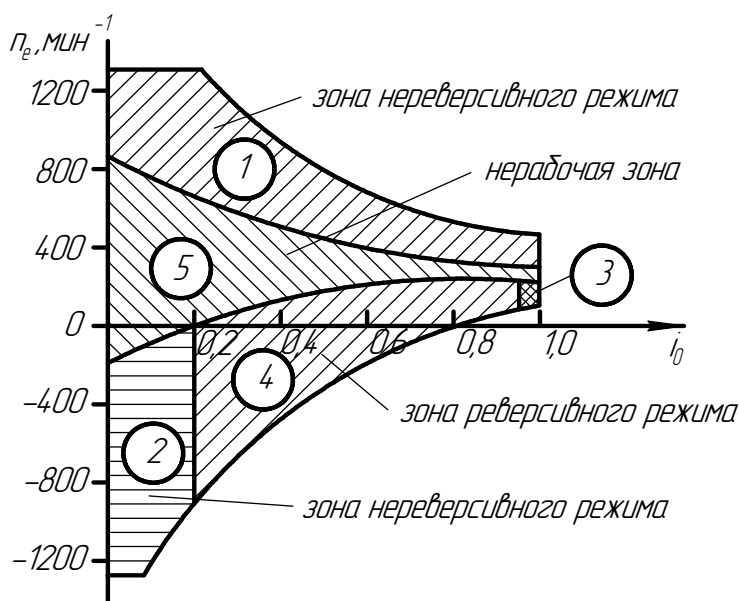


Рис. 2. Рабочие зоны дифференциального привода регулятора подачи нитей основы на ткацком автоматическом станке

Из графиков видно, что в зависимости от направления вращения вала электродвигателя по отношению к валу станка и величины передаточного отношения i_0 для различных скоростей вращения вала электродвигателя возможны случаи нереверсивного режима (без изменения направления вращения) – зоны 1, 2, 3 – и реверсивного – зона 4 (изменение направления вращения червяка).

Зона 5 является нерабочей зоной. В этой зоне скорость вращения червяка 4 будет равна или больше 189 мин^{-1} для всех рассматриваемых значений i_0 .

Наиболее благоприятной для работы регулятора представляется зона 1.

Зона 2 нереверсивного режима для малых значений i_0 предполагает довольно широкий диапазон изменения скорости вращения вала A .

Так, при $i_0 = 0,2$ отношение максимальной скорости n_A^{\max} к минимальной скорости n_A^{\min} равняется

$$R_A = n_A^{\max} / n_A^{\min} = 62,7, \quad (3)$$

где R_A – диапазон регулирования скорости вала червяка.

Широкий диапазон изменения скорости для регулируемых двигателей приводит к значительному снижению мощности при работе его на низких скоростях вращения. Например, для электродвигателя, имеющего мощность $N = 250$ Вт, при номинальной скорости вращения его вала $n_d = 4000$ мин⁻¹ уменьшение частоты вращения до $n_d = 1000$ мин⁻¹ вызовет снижение мощности электродвигателя до мощности, равной 62,5 Вт. А так как мощность, развиваемая регулируемым электродвигателем, должна быть больше мощности от сил сопротивления, то использование широкого диапазона скоростей вращения вала электродвигателя приводит к снижению мощности при работе на низких скоростях вращения электродвигателя. С другой стороны, широкий диапазон регулируемых скоростей повышает точность регулирования скорости вращения вала червяка и, соответственно, навоя с нитями основы.

Удовлетворение обоих требований решается путем установления между электродвигателем M и дифференциалом дополнительного редуктора с передаточным отношением i_d . Увеличение i_d способствует снижению приведенных к валу электродвигателя моментов инерции вращающихся деталей M_A и моментов от сил сопротивления M_C , как показано на рисунке 3.

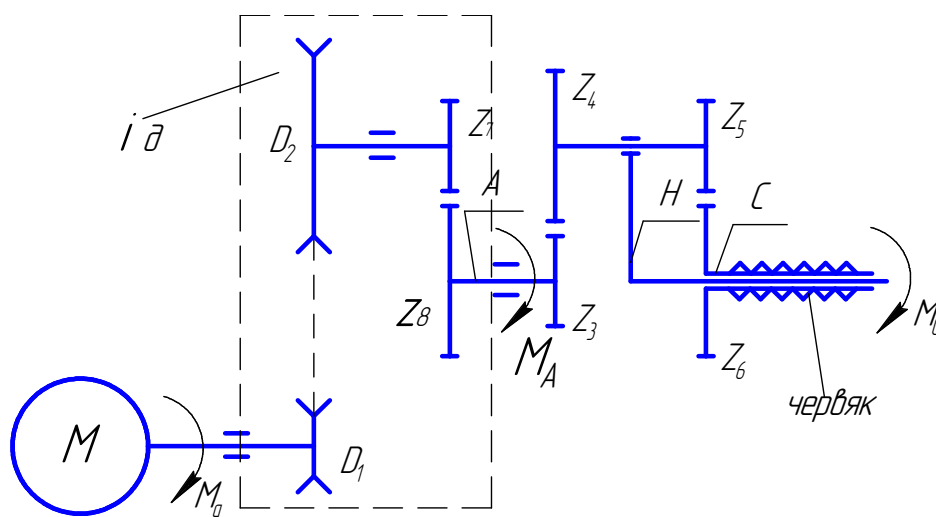


Рис. 3. Схема передачи движения от электродвигателя к дифференциалу посредством дополнительного редуктора

Выразим диапазон регулирования R_A через переменную скорость вращения $n_{\text{чер.}}$.

Обозначим через n_{A1} , $n_{\text{чер.1}}$ и n_{A2} , $n_{\text{чер.}}$ максимальную и минимальную скорость вращения вала A и вала C согласно рисунку 3.

С учетом выражения (3) для встречного вращения вала A и водила H имеем:

$$R_A = n_{A1} / n_{A2} = \{ [n_{\text{н.в.}}(1 + i_0) - n_{\text{чер.2}}] / [n_{\text{н.в.}}(1 - i_0) - n_{\text{чер.1}}] \},$$

откуда

$$i_0 = (R_A n_{\text{чер.1}} - n_{\text{чер.2}}) / [n_{\text{н.в.}}(R_A - 1)]. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет для конкретных значений R_A определить передаточное отношение i_0 дифференциального механизма.

В таблице представлены соотношения между R_A и i_0 при следующих значениях параметров: $n_{\text{чер.1}} = 189$ мин⁻¹, $n_{\text{н.в.}} = 240$ мин⁻¹, $n_{\text{чер.2}} = 3,8$ мин⁻¹.

Зависимость диапазона регулирования R_A от передаточного отношения i_0 дифференциала

i_0	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
R_A	2,5	2,6	2,08	1,95	1,85	1,76	1,69

Наиболее рациональным представляется выбор передаточного отношения i_0 в пределах $0,5 < i_0 < 0,8$.

Найдем величину момента, развиваемого электродвигателем и необходимого для осуществления подачи нитей основы с навоя.

Обозначим через M_C момент сопротивления на валу червяка. Тогда согласно рисунку 3 из соотношения $M_A = -i_o M_C$ и с учетом того, что $i_d = z_8 D_2 / z_7 D_1$, получим:

$$M_D = -(i_o / i_d \eta) M_C, \tag{5}$$

где $i_o = i_{CA}^H$; i_d , η – передаточные отношения цепи от редуктора ($D_1 - D_2, z_7 - z_8$) до дифференциала и КПД передачи.

На рисунке 4 представлена структурная схема передачи движения от электродвигателя M_d до навоя с нитями основы, заправочное натяжение которых обозначено через S .

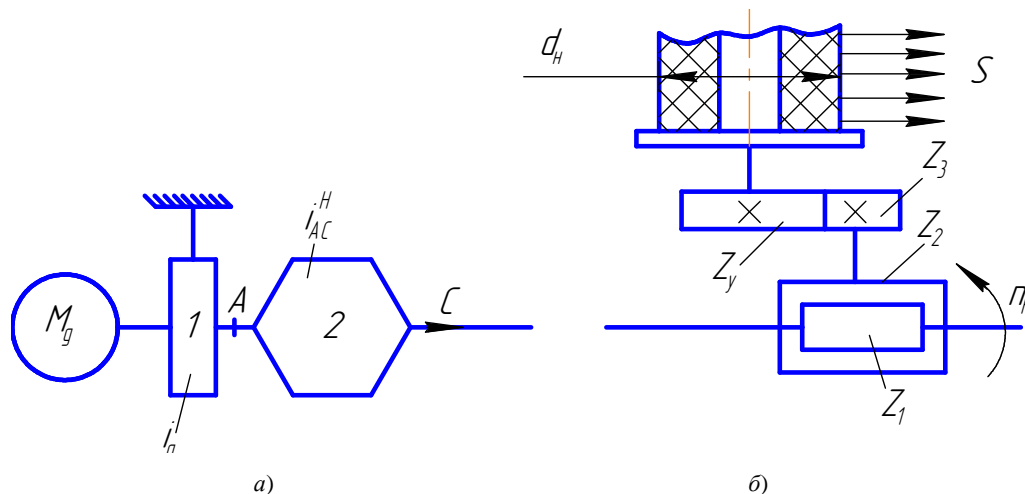


Рис. 4. Структурная схема и схема направления действия силовых и кинематических параметров в дифференциале

Момент сопротивления равен

$$M_C = (S d_H) / (2 i_H \eta_H), \tag{6}$$

где i_H, η_H – передаточное отношение $(z_1 / z_2) \cdot (z_3 / z_4)$ и КПД передачи от вала червяка z_1 к валу навоя станка z_4 ; S – заправочное натяжение нитей основы.

Из условия равенства мощности, развиваемой электродвигателем, и мощности сил сопротивления на валу червяка найдем

$$M_d = -(i_o d_H S) / (2 i_d \eta_H \eta_H). \tag{7}$$

При определении момента сопротивления червячной передачи необходимо учитывать зависимость КПД червячной передачи от скорости вращения червяка z_1 .

С уменьшением частоты вращения червяка и увеличением коэффициента трения в червячной передаче момент сопротивления будет возрастать.

При работе червячной передачи регулятора подачи нитей основы в реверсивном режиме отпуск основы сменяется «тяговым» режимом и, наоборот, при изменении скорости электродвигателя – отпуском основы.

Это имеет место в процессе разгона и выбега червяка z_4 (см. рис. 4), а также в переходных процессах при максимальных значениях радиусов навоя $r_H^{max} = d_H^{max} / 2$.

Закон изменения частоты n_C при переменном n_A и $n_H = const$ определяется знаком и величиной передаточного отношения.

На рисунке 5 приведены графические зависимости изменения n_C для различных передаточных отношений i_{AC}^H . Точка O характеризует условие достижения блокировки механизма, когда все звенья дифференциала вращаются со скоростью наборного вала станка. Изменение режима червячной пары характеризуется точками E_i , где $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Проанализируем графики изменения скорости вращения червяка, а соответственно, и навоя с нитями основы применительно к схеме, представленной на рисунке 5.

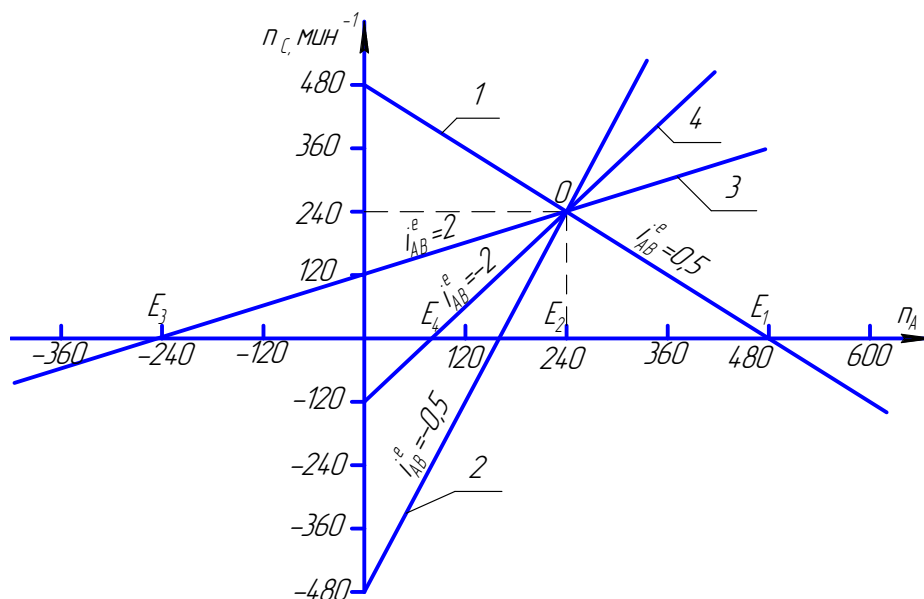


Рис. 5. Графические зависимости изменения скорости вращения червяка

Для прямой 1 характерно следующее: при остановленном электродвигателе идет ускоренный отпуск нитей основы с навоя, т.е. ускоряется скорость вращения червяка z_1 .

Достижение равновесного состояния, когда натяжение нитей основы S соответствует заданному режиму работы станка, может быть достигнуто реверсивным (противоположным) направлением червяка Z_1 (точка E_1). Скорость протекания процесса определяется углом наклона характеристики 1 к оси абсцисс (на графике ось n_A).

Все семейство прямых данного типа определяется значением передаточного отношения в пределах $0 < i_{AC}^H < 1$.

С уменьшением i_{AC}^H скорость протекания процесса самовывравнивания натяжения нитей основы увеличивается.

Процесс управления технологическим процессом, т.е. выравнивание натяжения нитей основы S по характеристике 1, можно описать следующим образом: станок работает на отпуск нитей основы, т.е. разматывание основы идет по направлению к формированию ткани, а электродвигатель M_d работает на натяжение нитей основы, а именно в противоположном направлении.

Недостатком дифференциальных передач, реализующих рассматриваемое семейство характеристик, является повышение частот n_A при $n_c = 0$, что в целях увеличения передаточного отношения i_d дополнительного редуктора и уменьшения движущих моментов на валу электродвигателя, требует применения высокоскоростных или высокомоментных специальных электродвигателей, а не серийно выпускаемых. Уменьшение частоты n_A при $n_c = 0$ может быть достигнуто за счет уменьшения частоты вращения вала H .

В соответствии с характеристикой 2 можно установить: наборный вал станка работает на натяжение нитей основы (намотка), а электродвигатель M_d работает на отпуск (размотка) основных нитей.

При приложении возмущающего воздействия к червяку z_1 (возрастание натяжения основы) и замедления скорости вращения вала электродвигателя M_d , натяжение нитей основы еще более возрастает.

Время стабилизации натяжения определяется длительностью переходного процесса всей системы автоматического регулирования. Низкие значения скорости n_A при $n_c = 0$ данного семейства прямых ($-1 < i_{AC}^H < 0$) способствуют повышению передаточного отношения в сравнении с передачей, реализующей значения $0 < i_{AC}^H < 1$.

Передачи, реализующие закон изменения скорости n_c в соответствии с семейством прямых типа 3 ($i_{AC}^H > 1$), более пригодны для выработки тканей на ткацком станке повышенной плотности.

Характеристика типа 4 ($i_{AC}^H < 1$) отличается от прямых типа 2 величиной угла α наклона прямой к оси n_A .

Исходя из изложенного выше можно сделать следующие выводы:

- для прямых типа 2 и 4 общим является то, что резкое увеличение момента сопротивления на валу регулируемого электродвигателя вызовет снижение угловой скорости вращения червяка (навоя), при этом натяжение нитей основы возрастает;

- для работы дифференциальной передачи в соответствии с характеристиками 1 и 3 типично обратное явление – увеличение натяжения нитей основы за счет увеличения скорости вращения червяка, что способствует снижению натяжения нитей основы.

Таким образом, для реализации широкого диапазона скоростей вращения червяка и применения электродвигателя небольшой мощности необходимо увеличить абсолютную величину угла наклона α графика прямых (см. рис. 5) и уменьшить скорость вращения наборного вала станка. Это позволит применить редуктор с высоким передаточным отношением и уменьшить приведенный момент сопротивления на валу регулируемого электродвигателя.

Заключение. Регулирование процесса ткачества на ткацких станках – актуальная проблема для выпуска качественной и конкурентоспособной продукции. Особенностью систем регулирования процессов ткачества с помощью дифференциального механизма основного регулятора позволяет вырабатывать широкий ассортимент тканей при использовании простых дифференциальных механических передач с управляемыми электродвигателями малой мощности, что обеспечивает точность регулирования и подачи основы при выработке тканей на ткацких станках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седел, О.Я. Синтез дифференциальных механизмов регулирования технологического процесса на станках / О.Я. Седел // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 24–30.
2. Кирдяшев, Ю.Н. Многопоточные передачи дифференциального типа / Ю.Н. Кирдяшев. – Л.: Машиностроение, 1977.
3. Седел, О.Я. Оптимизация параметров мощности дифференциального привода с учетом диапазона регулирования скорости ведомого звена / О.Я. Седел // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 11. – С. 58–63.

Поступила 29.01.2015

SYNTHESIS OF DIFFERENTIAL DRIVE PROCESS CONTROL ON WEAVING AUTOMATIC MACHINES

O. SEDEL

The article describes the design features tension control and supply of warp in forming fabric on looms with a controlled differential drive. Made structure synthesis and optimization of power parameters of the differential mechanism, taking into account the range of regulated speed of the driven member of the regulator. The use of this control tension and warp feeding enable the production of quality fabrics in wide range.

УДК 620.16

ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ВОССТАНОВЛЕННЫХ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

*канд. техн. наук, доц. С.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ;
канд. техн. наук, доц. В.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Эксплуатационные испытания восстановленных коленчатых валов современных тракторов показали, что поломки происходят из-за снижения усталостной прочности. Одним из способов повышения выносливости коленчатого вала является упрочнение методом поверхностного пластического деформирования галтелей шатунных шеек после восстановления наплавкой. Проведенные исследования по восстановлению изношенных шеек коленчатых валов двигателя Д-240 с последующим упрочнением галтелей выявили значительный резерв повышения усталостной прочности, составляющий 25...30 % и более.

Введение. Коленчатый вал – одна из важных дорогостоящих деталей двигателя, в значительной степени определяющая его ресурс. Особенно быстро выходят из строя коленчатые валы тракторных двигателей, работающих в более тяжелых условиях по сравнению с автомобильными. Если средняя эксплуатационная нагрузка автомобильных двигателей составляет 50...60 %, то тракторных – при выполнении многих сельскохозяйственных работ – 95...98 %. Удельное давление на наиболее нагруженные шатунные шейки коленчатых валов тракторных двигателей в 1,5...2 раза выше, чем у автомобильных. В процессе эксплуатации сопротивление усталости тракторных коленчатых валов снижается на 25...30 %. Основными причинами выбраковки коленчатых валов двигателей являются износ шеек и их поломки в области галтелей (рис. 1).



Рис. 1. Характерные виды отказов и поломок коленчатых валов двигателей

Локальный характер разрушения коленчатых валов показывает, что кинетика разрушения определяется развитием трещин. Механизм процесса разрушения при длительном воздействии нагрузки сводится к постепенному росту микротрещин до критического размера. Возникновение трещин на галтелях и на расстоянии до 10 мм от них значительно снижает сопротивление усталости, и валы с таким дефектом не подлежат восстановлению. Что касается возможности восстановления коленчатых валов с трещинами на шейках, то валы, имеющие на шейках трещины длиной не более 10...12 мм, глубиной до 3 мм, могут быть восстановлены последующей наплавкой без существенного снижения сопротивления усталости. Изношенные

валы с коренными и шатунными шейками, перешлифованные на все ремонтные размеры, но пригодные для восстановления путем нанесения покрытий до номинальных размеров, составляют 65...75 % [1–3].

При наплавке легирующими материалами без применения термообработки на галтелях между шейками и щеками образуется зона сплавления, имеющая низкую пластичность, а в зоне термического влияния из-за резкой структурной неоднородности возникают трещины, микротрещины, усиливается концентрация напряжений, снижается сопротивление усталости. При этом из-за значительного термического влияния происходит деформация вала. Таким образом, несмотря на то, что в наплавленном слое образуется структура мартенсита, обеспечивающая сжимающие напряжения, низкая пластичность в зоне сплавления служит основной причиной снижения сопротивления усталости.

Долговечность коленчатых валов в значительной степени определяется сопротивлением усталости. Отрицательное влияние на сопротивление усталости оказывают растягивающие напряжения, которые вызываются неоднородностью пластической деформации, различием коэффициентов расширения основного и наплавленного металлов, структурными превращениями в наплавленном металле и зоне термического влияния. Результатом возникновения остаточных растягивающих напряжений являются низкая прочность и малая пластичность слоя, образующегося в процессе наплавки на границе сплавления основного и наплавочного металлов. Восстановление коленчатых валов тракторных двигателей плазменной наплавкой порошковыми сплавами малогабаритным плазматроном без заправки галтелей снижает усталостную прочность до 45 %.

С целью повышения усталостной прочности деталей применяют технологические процессы, основанные на изменении физических свойств, химического состава, структуры и напряженного состояния поверхностных слоев материала деталей [4; 5]. Наибольшее распространение получили механические способы упрочнения методом поверхностного пластического деформирования (ППД) благодаря таким достоинствам, как:

- простота изготовления;
- невысокая стоимость;
- применение практически для всех видов металлов и для деталей любой формы;
- создание глубины упрочнённого слоя до 20 мм;
- границы наклёпанной поверхности не являются зонами пониженной прочности;
- эффективность наклёпа в сравнении с другими методами значительно меньше зависит от режима наклёпа;
- при повышении усталостной прочности ударная вязкость снижается значительно меньше, чем при обработке другими способами.

Испытания по определению усталостной прочности проводили на образцах (рис. 2), имитирующих шейку коленчатого вала с галтелями. Образцы изготовлены из стали марки 45X, соответствующей марке стали коленчатых валов двигателя Д-240.

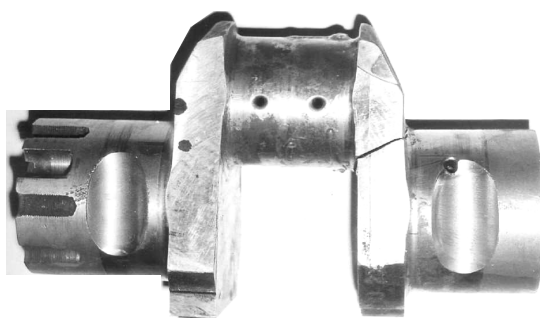


Рис. 2. Модель натурального образца коленчатого вала

Испытания проводили на резонансной машине УП-50, позволяющей создать изгибающий момент на испытуемом образце по симметричному циклу на базе $2 \cdot 10^6$ циклов [6].

Исследования проводились на натуральных образцах с элементом шатунных шеек, выполненных в двух сериях: 1 серия – без упрочнения; 2 серия – с упрочнением дробью $\varnothing 3$ мм.

Упрочнение осуществляли специальным приспособлением при усилии накатывания до 8 кН, $n = 251/\text{мин}$, $\tau = 60$ с.

Для закрепления натуральных образцов на испытательной машине их подвергали дополнительной обработке. Щёки натуральных образцов с элементом шатунных шеек фрезеровались (в зоне вероятного разрушения) в размер, равный 105 мм для всех образцов. Перед нагружением образцы тарировали с помо-

стью динамометра. По тарировочному графику устанавливалась амплитуда деформации в зависимости от испытательного усилия.

В каждой серии испытывалось 2 образца, что при испытании натуральных моделей соответствует точности 7...8 %. Точность нагрузки при испытании поддерживалась в диапазоне $\pm 5\%$.

Предварительно установлены следующие режимы упрочнения: давление воздуха 0,46...0,48 МПа; продолжительность обработки 5 мин. Выбранные режимы упрочнения обеспечивают насыщение поверхности галтелей следами отпечатков и достаточны для одновременного упрочнения наплавленного слоя. Статическая тарировка осуществлялась с помощью динамометра типа ДОСМ-1000. Испытание образца считалось законченным с момента зарождения усталостной трещины или после отработки им без разрушения принятой базы испытаний. Общий вид образцов, доведенных до разрушения, представлен на рисунке 3.

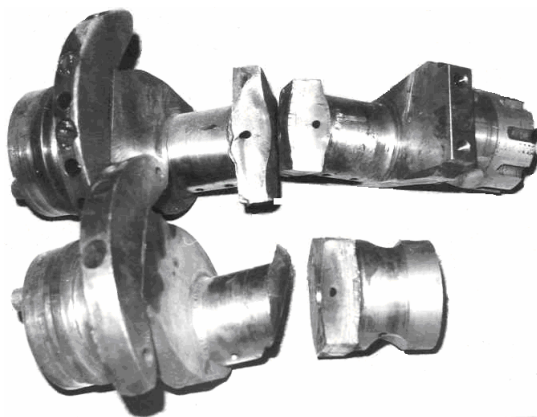


Рис. 3. Общий вид образцов после испытаний

Момент появления усталостной трещины легко определяется по изменению режима работы установки (увеличение амплитуды колебаний при заданной частоте). Предел выносливости определялся с точности до 10 МПа.

Представленные на рисунке 4 результаты исследования свидетельствуют о том, что упрочнение галтелей восстановленных коленчатых валов пневмодинамическим наклепом шариками диаметром 3 мм увеличивает их предел выносливости при изгибе от 40...60 до 90 МПа, т.е. в 1,5 раза и более, а по количеству циклов нагружения при одинаковой нагрузке 5 кН – более чем в 5 раз.

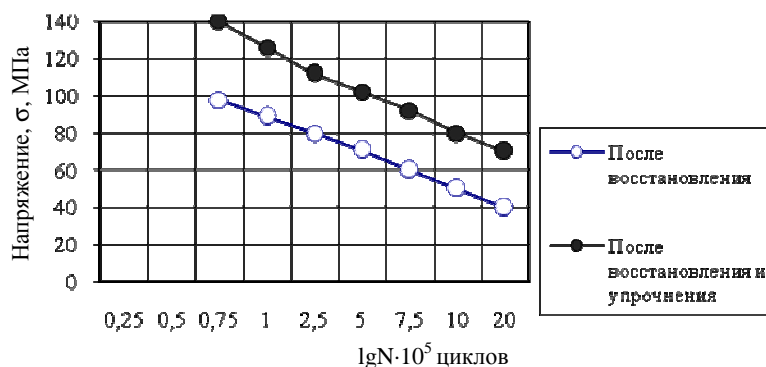


Рис. 4. Кривые усталости натуральных образцов

Глубина наклепа определяется по эмпирической формуле

$$\delta_n = \frac{C d_d v_d}{U} \sqrt{\frac{\rho(1-K^2)}{6gHB}}, \quad (1)$$

где C – коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-механических свойств материала, $C = 18...20$; d_d – диаметр дроби; v_d – скорость дроби при встрече с обрабатываемой поверхностью; U – приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей $U = (1 + 0,07R)$; R – радиус кривизны сферической дроби; ρ – плотность материала деформирующего элемента; K – коэффициент восстановления при ударе; g – ускорение свободного падения; HB – твердость по Бринеллю.

Для стальных шариков $\varnothing 3$ мм $v_d = 17,7$ м/с при давлении в пневмосети $P = 0,4$ МПа. При этом следует отметить, что для увеличения усталостной прочности коленчатого вала недостаточно упрочнения галтелей только на шатунных шейках, так как начало зарождения трещины может появиться в неупрочненных галтелях на коренных шейках.

Для расчета надежности деталей машин с повреждениями методами механики разрушения необходимо знать значение коэффициента интенсивности напряжений K_1 (КИН). Выражение для КИН в коленчатом валу [4] в общем виде можно записать следующим образом:

$$K_1 = Y_B \sigma \sqrt{2c}, \quad (2)$$

где Y_B – геометрический фактор для вала; σ – напряжение изгиба ($\sigma = 32M/\pi D_u^3$); M – изгибающий момент; $2c$ – длина трещины по поверхности шейки вала; D_u – диаметр шейки вала.

В процессе развития трещины жесткость вала снижается, и большая часть трещины развивается в зоне, где отсутствуют остаточные напряжения сжатия.

Полученные данные о геометрическом факторе для валов и диаграмме усталостного разрушения позволяют рассчитать размер неразвивающихся трещин при напряжении и числе циклов, которые необходимы для развития трещин от одного размера до другого.

Зависимость порогового напряжения σ_{th} , при котором трещина не развивается, от размера трещины в валу получена по формуле

$$\sigma_{th} = \frac{K_{th}}{Y_B} \sqrt{2c}, \quad (3)$$

где K_{th} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений.

Эти данные позволяют оценить относительную опасность трещин разного размера, так как в долговечности вала стадия развития усталостной трещины занимает значительную долю.

Известно [5], что при циклическом нагружении у вершины трещины образуются две зоны: статическая и циклическая. При переходе роста трещины пороговой скорости происходит скачкообразное изменение размера пластической зоны на фронте трещины и образование усталостных бороздок. Размер статической зоны связан с пределом текучести материала; для поверхностной трещины можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\frac{r_p}{l} = 0,25 \left(\frac{\sigma_{max}}{\delta_y} \right)^2, \quad (4)$$

где r_p – размер статической зоны; l – длина трещины; σ_{max} – максимальное напряжение; δ_y – предел текучести.

Это позволяет согласно условию подобия локального напряженно-деформированного состояния оценивать состояние и ресурс материалов валов по условиям одной и той же величины отношения размера пластической деформации к длине трещины.

В связи с тем, что при анализе усталостного разрушения реальных объектов часто важно знать, каков вклад стадии зарождения и стадии распространения трещины в общую долговечность, в некоторых случаях использовали коленчатые валы с заранее созданными концентраторами [6], которыми служили отверстия, выполненные сверлом диаметром 0,6 мм. Совпадение кинетических кривых развития трещины в коленчатых валах с концентратором, с соответствующими участками кинетических кривых в идентичных валах без концентратора, свидетельствует об инвариантном характере закона развития усталостных трещин в чугунных коленчатых валах при наличии концентраторов выбранных размеров. Несимметричность развития усталостной трещины по обе стороны от концентратора оказалась незначительной. Поэтому при построении зависимости длины трещины от числа циклов, не допуская большой погрешности, использовали значение увеличения размера одного конца трещины, принимая его за полудлину трещины. Точно также осуществляли построение кинетических кривых и при отсутствии концентраторов. Однако в этом случае наблюдение за развитием трещины удалось вести с того момента, когда ее размеры уже достигали 2...3 мм. Дальнейший рост одного из концов трещины фиксировали непосредственно по шкале окуляра микроскопа.

Исследования показали преимущественную роль стадии распространения усталостной трещины в общей доле долговечности по сравнению со стадией зарождения этой трещины [7–8]. Даже если отнести к стадии зарождения трещины период ее развития до 2 мм, то и тогда эта стадия для коленчатого вала с неупрочненной галтелью составляет несколько более 10 %, а для коленчатого вала с упрочненной галте-

лю – около 40 %. Рассматриваемые образцы испытывали при существенно отличных номинальных напряжениях: для упрочненного методом ППД $\sigma_n = 350$ МПа, для неупрочненного $\sigma_n = 200$ МПа.

В заключение исследования можно сделать **вывод**, что основными факторами, способствующими повышению сопротивления усталости восстановленных коленчатых валов, могут служить следующие:

- 1) создание напряжений сжатия в поверхностных слоях;
- 2) сближение значений коэффициента линейного расширения основного и наплавочного металлов;
- 3) выбор глубины проплавления. К восстановлению наплавкой рекомендуются изношенные коленчатые валы с трещинами на шейках длиной до 12 мм и глубиной до 3 мм. Поэтому проплавление поверхности шейки, галтелей – необходимое условие не только получения высокой прочности сцепления, но главным образом устранения трещин. Проплавление шеек на глубину более 1,5 мм приводит к значительному увеличению деформаций;
- 4) усталостная прочность коленчатых валов Д-240 из стали 45Х, прошедших восстановительный ремонт с плазменной наплавкой шатунных и коренных шеек и последующей шлифовкой галтельных переходов, может быть значительно увеличена за счёт внедрения упрочнения галтелей пневмодинамическим наклёпом шариками диаметром 3 мм;
- 5) предел выносливости при изгибе натуральных моделей коленчатых валов с упрочнёнными галтелями увеличивается на 50 % и более, а их долговечность при одинаковом уровне испытательной нагрузки возрастает более чем в 5 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров, А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А.И. Сидоров. – М.: Машиностроение, 1987. – 192 с.
2. Нигородов, В.В. Восстановление коленчатых валов автотракторных двигателей / В.В. Нигородов, В.Г. Ерошкин. – М.: ЦНИИТЭИ, 1981. – 49 с.
3. Горохов, В.А. Ремонт и восстановление коленчатых валов / В.А. Горохов, П.А. Руденко. – М.: Колос, 1978. – 159 с.
4. Об усталостной трещиностойкости коленчатых валов / А.В. Прокопенко [и др.] // Проблемы прочности. – 1983. – № 5. – С. 53–55.
5. Романов, А.Н. Пороговая скорость роста усталостной трещины и циклическая трещиностойкость металлов / А.Н. Романов, О.В. Иванова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1993. – № 5. – С. 35–41.
6. Завистовский, С.Э. Анализ технологических способов упрочнения коленчатых валов ДВС методом ППД / С.Э. Завистовский, А.С. Кириенко // Материалы, технологии и оборудования в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. / под общ. ред. П.А. Витязя. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2009. – Т. 3. – С. 165–168.
7. Завистовский, С.Э. Исследование влияния технологических режимов пневмодинамического упрочнения на изменение прочности и твердости галтелей серийных коленчатых валов тракторов «Беларусь» / С.Э. Завистовский, Т.И. Завистовская // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 29–30 окт. 2013 г. – Новополоцк, 2013. – С. 183–186.
8. Исследование усталостной прочности коленчатых валов, упрочненных методом ППД / М.А. Белоцерковский [и др.] // Материалы, технологии и оборудования в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. / под общ. ред. П.А. Витязя. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2009. – Т. 2. – С. 235–238.

Поступила 27.01.2015

RESIDUAL LIFE OF REMANUFACTURED CRANKSHAFTS

S. ZAVISTOVSKY, V. ZAVISTOVSKY

Performance tests of recovered crankshafts of modern tractors showed that breakages occur due to fatigue strength reduction. One of the ways to improve the endurance of the crankshafts is the consolidation of crankpins after their restoration by welding using the method of surface plastic deformation of fillets. Studies on restoration of worn out crankshaft of engine D-240 journals, followed by hardening of fillets showed a significant increase in fatigue strength reserve which amounts to 25...30 % or more.

УДК 621.91

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ
ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ПРИПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ****В.Я. НИКОЛАЙЧУК***(Винницкий национальный аграрный университет, Украина);**канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН**(Полоцкий государственный университет, Беларусь);***Е.Е. КОЖЕВНИКОВА***(Одесская национальная морская академия, Украина);**канд. техн. наук Л.А. ЛОПАТА**(Институт проблем прочности НАН Украины, Киев)*

На основе экспериментальных исследований и с использованием методов математического моделирования представлена комплексная оценка влияния основных технологических параметров (давления, силы тока, скорости припекания) процесса электроконтактного припекания порошков на физико-механические свойства полученных покрытий (прочность сцепления и износостойкость). Многофакторный эксперимент с определенным варьированием этих параметров позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий и выявить эффекты взаимодействия. Сделан вывод о том, что с целью улучшения физико-механических свойств получаемых покрытий целесообразно комплексно использовать все три технологические параметры рассматриваемого процесса.

Состояние проблемы. С развитием технологий поверхностного упрочнения и нанесения покрытий возможности эмпирически-интуитивных подходов в выборе способов нанесения покрытий и их технологических режимов исчерпаны. Ввиду сложности физико-химических процессов, происходящих при нанесении покрытий, в настоящее время не существует аналитических зависимостей, которые дали бы возможность описать и всесторонне изучить технологию создания композиции «покрытие – деталь». Без определения механических свойств системы «деталь – покрытие», анализа напряженно-деформированного состояния, расчетов на прочность на стадии проектирования и ведения технологического процесса невозможно создание прочной и долговечной детали с покрытием. Это приводит к тому, что эксперимент становится одним из основных средств получения информации об исследуемом процессе нанесения покрытия. Без применения статистических методов сложно решить задачу получения максимально достоверной информации о способах нанесения покрытий. Экспериментально-статистические методы позволяют существенно сократить период технологических и конструкторских разработок. При обработке технологии нанесения покрытий экспериментальные исследования проводят на образцах, так как непосредственное нанесение покрытий на детали и испытание их на реальных объектах – трудоемкий и дорогостоящий процесс.

Разработка технологического процесса неизбежно связана с решением оптимизационных задач. Это объясняется тем, что большое количество способов нанесения в сочетании с обширной номенклатурой материалов, из которых формируют покрытие, а также большое количество влияющих факторов предоставляет технологам широкий ряд альтернативных вариантов. В такой ситуации эффективность принимаемых решений зависит от наличия критерия оценки работоспособности покрытий в заданных условиях эксплуатации. Выбор покрытий и оптимизация технологий их получения весьма сложны, так как структура, толщина покрытия, его состав зависят от многих факторов. Для оптимизации технологии получения покрытий, грамотного их применения необходимо глубокое знание механизмов разупрочнения и разрушения покрытий, их влияния на прочность защищаемых деталей и долговечность в различных температурно-силовых условиях.

Характерной особенностью методов поверхностного упрочнения является то, что не удается получить одновременного повышения всех эксплуатационных свойств детали для всех режимов эксплуатации. Даже один и тот же материал покрытия, но нанесенный разными способами, показывает различные эксплуатационные свойства. Высокая чувствительность механических характеристик покрытия к режимам их нанесения требует оптимизации технологического процесса (ТП) электроконтактного припекания порошков (ЭКПП).

Цель данного исследования – определение оптимальных технологических параметров процесса электроконтактного припекания порошковых покрытий и их влияния на толщину слоя порошка и на прочность сцепления его с основой.

Результаты исследования. Основными параметрами, определяющими режим припекания, являются давление и сила тока. Как известно [1], минимальная величина удельного давления при ЭКПП со-

ставляет 10 МПа. При давлениях менее 10 МПа и при пропуске электрического тока между частицами возникают слабые контактные связи, которые не позволяют получать качественные покрытия. Значения давления, превышающие 60 МПа, вызывают разрушение электродов контактных сварочных машин. В результате экспериментальных исследований была установлена зависимость от давления основных свойств покрытий, таких как прочность сцепления, пористость, износостойкость. Из графиков (рис. 1) видно, что оптимальное значение давления, при котором достигается максимальная износостойкость, прочность сцепления при необходимой пористости до 3 % составляет 35...45 МПа. Кроме давления, не менее важным технологическим параметром при ЭКПП является сила тока. Ток, необходимый для нанесения качественных покрытий, должен иметь такую величину, которая обеспечит нагрев порошкового слоя до температуры $(0,9...0,95) T_{пл}$.

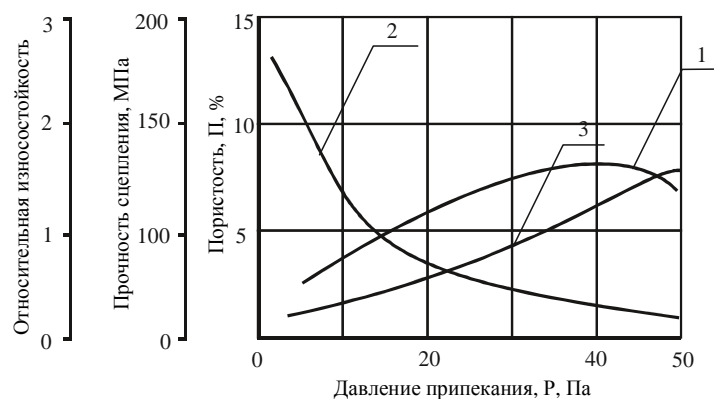


Рис. 1. Зависимость относительной износостойкости, прочности сцепления и пористости от давления припекания: 1 – прочность сцепления; 2 – пористость; 3 – относительная износостойкость

Размеры частиц порошка в значительной степени влияют на удельное электросопротивление порошкового слоя, а следовательно и на силу тока припекания. Основной составляющей общего электрического сопротивления является сопротивление порошкового материала, который состоит из сопротивления межчастичных контактов (окислительных пленок) и, собственно, сопротивления материала порошка. Частицы порошка меньшего размера имеют более высокое электросопротивление из-за большей общей площади поверхности контакта, которая, как правило, покрыта окислительными пленками, следовательно, для нагрева до необходимой температуры требуются высокие значения силы тока. Однако покрытия из порошков крупной фракции (рис. 2) имеют низкую прочность сцепления из-за высокой пористости (малой площади контакта с основанием).

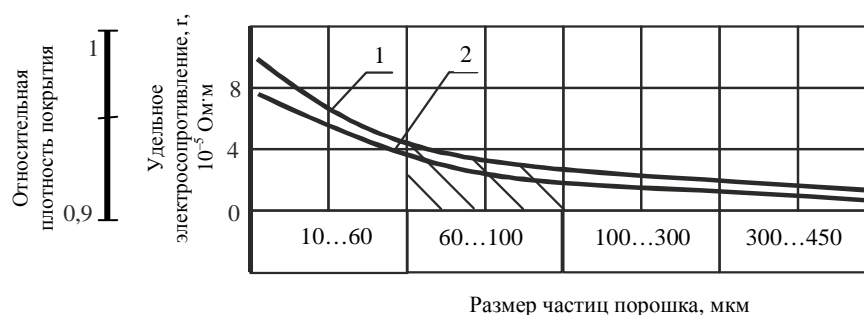


Рис. 2. Влияние размера фракции порошка на удельное электросопротивление формовки (1) и относительную плотность покрытия (2); – оптимальный размер фракции

Нагрев композиционных порошков (карбидов, боридов, алмаза) с никелевой или кобальтовой связкой, диффузионно-легированных (железо, легированное бором), происходит по оболочкам, которые имеют значительно более высокое электросопротивление. Толщина диффузионной оболочки влияет на износостойкость покрытия, а также существенно сказывается на общем электросопротивлении порошкового слоя. Оптимальная толщина диффузионной оболочки (рис. 3) составляет 10...15 мкм. Дальнейшее увеличение толщины оболочки не приводит к повышению износостойкости покрытия. Технологические

параметры разрабатываемого процесса должны обеспечивать заданные свойства покрытия и работоспособность изделия в целом. Для определения оптимальных режимов процесса электроконтактного припекания порошков исследовалось влияние технологических параметров на прочность сцепления покрытия с основой и относительную износостойкость.

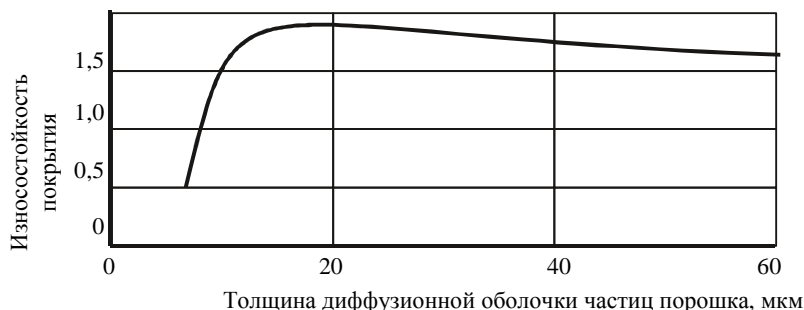


Рис. 3. Зависимость износостойкости покрытия от толщины диффузионной оболочки частиц порошка

Оптимизация технологии электроконтактного припекания порошковых материалов. В результате экспериментальных исследований ЭКПП в качестве основных факторов, определяющих качество получаемого покрытия, были определены управляемые технологические параметры: давление на порошковый слой; действующее значение силы тока и скорости припекания.

С целью комплексной оценки влияния основных технологических параметров (давления, тока припекания, скорости) процесса ЭКПП на физико-механические свойства покрытий (прочность сцепления и износостойкость) проводились эксперименты с использованием методов математического моделирования [2; 3].

Параметрами оптимизации являлись относительная износостойкость (ϵ) и прочность сцепления ($\sigma_{сц}$). Был реализован полнофакторный эксперимент 2^3 с варьированием на 2-х уровнях технологических факторов давления P , силы тока I и скорости v . Количество опытов $N_j = 8$. Количество измерений в каждом опыте при измерении износостойкости и прочности сцепления $\sigma_{сц}$ равна 3. Под количеством измерений понимается количество образцов, на которых определялось значение параметра оптимизации в каждом опыте j . Значение прочности сцепления определялось как среднее арифметическое измерений на каждом образце. Факторы и их уровни приведены в таблице 1, матрица планирования показана в таблице 2.

Таблица 1

Значение варьируемых факторов и их уровни

Уровни	Факторы			Кодированное значение факторов
	P , МПа	I , кА	v , м/с	
	X_1	X_2	X_3	
Нижний	10	1	0,001	-1
Верхний	40	15	0,01	+1
Нулевой	30	8	0,0055	0
Интервал варьирования	20	7	0,0045	

Таблица 2

Матрица планирования полнофакторного эксперимента плана 2^3

№ эксперимента	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

В таблице 3 приведен порядок математической обработки результатов экспериментов. Коэффициенты регрессии определяли, пользуясь методом наименьших квадратов. Численные значения коэффициентов подсчитывались на основе данных таблиц 3–5.

Таблица 3

Обработка результатов многофакторного эксперимента

Наименование определяемого параметра	Обозначение (условно)	Расчетная формула
Среднее значение параметра оптимизации в эксперименте	\bar{Y}_q	$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n Y_q$
Дисперсия эксперимента	$S^2\{\bar{Y}_j\}$	$S^2\{\bar{Y}_j\} = \frac{1}{n-1} \sum_{q=1}^n (Y_q - \bar{Y}_j)^2$
Дисперсия параметра оптимизации	$S^2\{Y_j\}$	$S^2\{Y_j\} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (S^2\{\bar{Y}_j\})$
Проверка однородности дисперсии	$G \leq G_{N,\nu,\alpha}$	$G = \frac{S^2\{\bar{Y}_j\}_{\max}}{\sum_{j=1}^N S^2\{\bar{Y}_j\}}; \nu = n-1$
Определение коэффициента уравнения регрессии	B_0, b_i	$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{Y}_j; b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji} Y_q$
Проверка значимости коэффициента уравнения регрессии	$b_i > \Delta b_i$	$\Delta b_i = S\{b_i\} t_{\nu,\alpha} = \sqrt{\frac{S^2\{Y_j\}}{Nn}} t_{\nu,\alpha};$ $\nu = N(n-1)$
Дисперсия адекватности	$S_{ад}^2$	$S_{ад}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{j=1}^N (\bar{Y}_j - Y_j^p)^2$
Проверка адекватности уравнения регрессии	$F \leq F_{\nu_1,\nu_2,\alpha}$	$F = \frac{nS_{ад}^2}{S^2\{Y\}};$ $\nu_{1(ад)} = N - B;$ $\nu_2(Y) = N(n-1)$
<p>Обозначения величин в таблицах следующие: Y – количество значимых коэффициентов уравнения регрессии; j – номер опыта в столбце матрицы ($j = 1, 2 \dots N$); $G, G_{N,\nu,\alpha}$ – экспериментальные значения критерия Кохрена; $t_{\nu,\alpha}$ – критерий Стьюдента при числе степеней свободы ν и уровне значимости α; $F_{\nu_1}, F_{\nu_2,\alpha}$ – экспериментальные и табличные значения критерия Фишера соответственно; y_j^p – значение параметра оптимизации bj-м опыте, предусмотрено уравнением регрессии.</p>		

В результате определения коэффициентов регрессии получены уравнения регрессии:
- по прочности сцепления

$$Y = 133 + 10,53X_1 + 5,5X_2 - 3,71X_3 - 2,71X_1X_2 + 4,54X_2X_3 - 6,03X_1X_2X_3; \quad (1)$$

- по относительной износостойкости

$$Y = 1,43 + 0,185X_1 + 0,115X_2 - 0,195X_3 - 0,03X_1X_2 + 0,085X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Анализируя уравнение (1), приходим к выводу, что на прочность сцепления главным образом влияет давление и сила тока, а также в несколько меньшей степени скорость припекания. Кроме того, оказались значительными эффекты взаимодействия давления и силы тока припекания, давления и скорости припекания.

При анализе уравнения (2) выясняется, что на относительную износостойкость в значительной степени влияют все три параметра: давление, ток и скорость. Следовательно, с целью получения качественных покрытий с высокой прочностью сцепления необходимо использовать все 3 указанные технологические параметры процесса: P, I, v . Почти в равной степени на прочность сцепления влияют давление и сила тока, а на износостойкость – величина силы тока и эффект взаимодействия силы тока и давления.

Таблица 4

Результаты многофакторного эксперимента по исследованию прочности сцепления

№ п/п	$Y_{\text{срч}} = (Y_q)$, МПа	\bar{Y}_j , МПа	$S^2\{Y_j^P\}$, МПа	Y_j^P	Статическая проверка гипотез
1	142 140 140	141,6	2,64	142,81	Дисперсия параметра оптимизации $S^2\{Y\} = 1,208$. Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена: $G = 0,208$; $G_{\text{табл}} = 0,5157$ при $\alpha = 0,05$ и $\nu = 2$. Дисперсии однородны. Доверительный интервал коэффициента регрессии Δb_i , $\Delta b_i = \pm 0,48$ при критерии Стьюдента $t = \pm 2,12$. Коэффициенты $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{23}, b_{123}$ – значимы. Проверка адекватности при помощи критерия Фишера: дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2 = 1,3$ $F_{\text{табл}} = 2,2$ при $\nu_1 = 17$; $\nu_2 = 16$; $F = 1,01$; $F < F_{\text{табл}}$, т.е. уравнение адекватно описывает результаты эксперимента
2	138 138 137	137,6	0,34	137,54	
3	138 140 139	139	1	138,52	
4	101 99 100	100	1	99,8	
5	153 150 152	151,6	2,34	151,52	
6	125 124 124	124,3	0,34	123,82	
7	143 144 142	143	1	142,96	
8	128 129 130	129	1	128,54	

Таблица 5

Результаты многофакторного эксперимента по исследованию относительной износостойкости

№ п/п	$Y_e = (Y_q)$	\bar{Y}_j	$S^2\{Y_j^P\}$	Y_j^P	Статическая проверка гипотез
1	1,6 1,65 1,62	1,62	0,00065	1,59	Дисперсия параметра оптимизации $S^2\{Y\} = 0,0024$. Проверка однородности дисперсий по критерию Кохрена: $G = 0,206$; $G_{\text{табл}} = 0,5157$ при $\alpha = 0,05$ и $\nu = 5$. Дисперсии однородны. Доверительный интервал коэффициента регрессии Δb_i , $\Delta b_i = \pm 0,0212$ по критерию Стьюдента $t = \pm 2,02$. Коэффициенты $b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{123}$ – значимы
2	1,1 1,1 1	1,1	0,005	1,11	
3	1,2 1,24 1,3	1,25	0,00255	1,25	
4	0,95 1 0,9	0,95	0,0025	0,99	
5	1,74 1,8 1,78	1,77	0,00255	1,81	
6	1,7 1,64 1,68	1,67	0,00095	1,67	
7	1,81 1,82 1,78	1,8	0,00345	1,81	Проверка адекватности при помощи критерия Фишера: дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2 = 0,017$; $F_{\text{табл}} = 1,8$ при $\nu_1 = 19$; $\nu_2 = 40$; $F = 0,053$; $F < F_{\text{табл}}$, т.е. уравнение адекватно описывает результаты эксперимента
8	1,2 1,25 1,28	1,24	0,00165	1,21	

Зависимости параметров оптимизации от технологических факторов (рис. 4), полученные в ходе экспериментальных исследований, подтверждают достоверность данных, полученных в результате проведения многофакторного эксперимента.

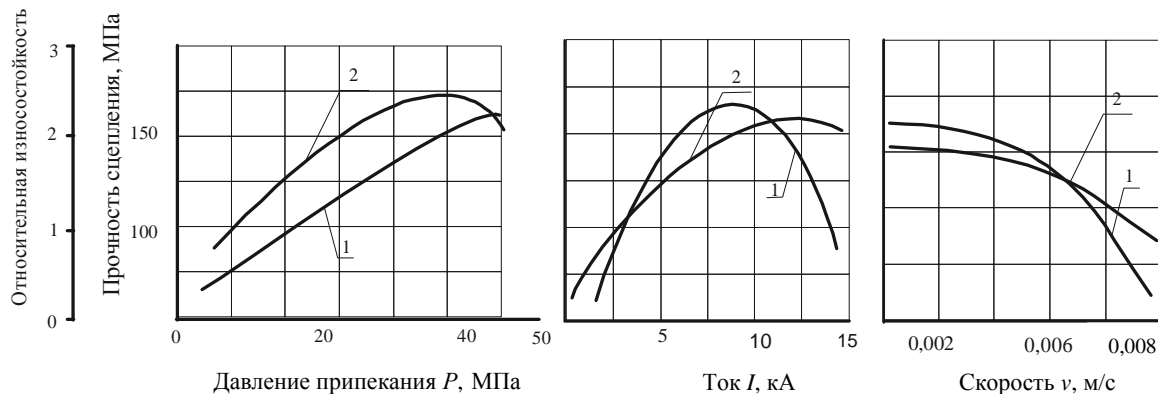


Рис. 4. Зависимость свойств покрытия от технологических режимов припекания:
1 – относительная износостойкость; 2 – прочность сцепления

Таким образом, многофакторный эксперимент с определенным варьированием основных технологических факторов позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий.

Заключение. Решение задач математического моделирования и многокритериальной оптимизации процесса формирования покрытий методом ЭКПП дает возможность получить комплексную оценку влияния входных (оптимизирующих) переменных исследуемого процесса на выходные показатели и конструировать оптимальные свойства покрытий с учетом технологии их изготовления и условий эксплуатации.

Многофакторный эксперимент с определенным варьированием основных технологических факторов позволил оценить влияние каждого из них на свойства покрытий, соотношение влияния, а также выявить эффекты взаимодействия. При этом с целью улучшения физико-механических свойств получаемых покрытий целесообразно комплексно использовать все три технологические параметры процесса ЭКПП: давление, силу тока и скорость припекания.

Оптимизация технологии ЭКПП позволила определить его оптимальные параметры: давление – 20...40 МПа; сила тока припекания – 8...16 кА. Благодаря оптимизации технологии электроконтактного припекания возможно: 1) установить влияние параметров процесса на свойства и структуру получаемых покрытий; 2) вести процесс в режиме спекания, а не наплавки, обеспечивая тем самым на границе «основа – деталь» отсутствие зоны перемешивания материала покрытия с материалом детали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Предпосылки управления качеством формируемого покрытия и соединения его с деталью при электроконтактном припекании / В.Н. Корж [и др.] // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеви машинобудування, автоматизація: зб. наукових праць Кіровоградського нац. техн. ун-ту. Вип. 23, Кіровоград, 2010. – С. 339–344.
2. Радченко, С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем / С.Г. Радченко // Навчальний посібник. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2001. – 88 с.
3. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: метод. вказівки до лаборатор.-комп'ютер. практикуму для студ. спец. «Технологія машинобудування» усіх форм навчання / уклад.: С.М. Лапач, С.Г. Радченко, Р.В. Галайда. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 116 с.

Поступила 23.01.2015

DETERMINING THE OPTIMAL TIMING OF THE ELECTROCONTACT SINTERING PROCESS FOR POWDER COATINGS

V. NICOLAICHUK, A. DUDAN, E. KOZHEVNIKOVA, L. LOPATA

On the basis of experimental studies and using mathematical modeling comprehensive assessment of the impact of major technological parameters (pressure, current, speed of sintering) of the electrocontact sintering process of powders on physical and mechanical properties of the coatings (adhesion strength and durability) is given. Multivariate experiment with a certain variation of these parameters allowed us to estimate the impact of each of them on the properties of the coatings and to identify the effects of the interaction. It is concluded that in order to improve the physical and mechanical properties of the resulting coatings is advisable to use all three complex technological parameters of the process.

УДК 621.43

СОЗДАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.В. КОСТРИЦКИЙ; канд. техн. наук, доц. **А.Л. ЛИСОВСКИЙ**;
канд. техн. наук, доц. **А.В. ДУДАН**
(Полоцкий государственный университет)

Определены с точки зрения максимизации гидродинамической несущей способности шаго-высотные параметры микрорельефа, которые могут обеспечить минимальную, но достаточную ширину зазора в сопряжениях цилиндропоршневой группы для обеспечения жидкостного трения. Исследованы тепловые процессы лазерной обработки, установлены закономерности между параметрами микрорельефа и режимами лазерной обработки. В результате проведенных исследований разработан способ образования микрорельефа на внутренней поверхности гильзы, который включает оплавление выступов поверхности лазерным излучением с последующим хонингованием выступов микрорельефа до необходимой высоты.

Введение. Повышение износостойкости трущейся поверхности гильзы цилиндров является актуальной проблемой в автомобильном двигателестроении. Основным подходом решения данной задачи на современном этапе развития двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является конструктивный подход, а в его рамках профилирование внутренней поверхности гильзы [1]. Однако из-за особенности кинематики цилиндропоршневой группы (ЦПГ) в зонах, где скорость поршня равна нулю (в так называемых мертвых точках), этот метод по снижению трения малоэффективен. Поверхностный слой этих зон помимо механической обработки поверхности до шероховатости $Ra = 0,32 \dots 0,08$ мкм должен обладать существенно улучшенными основными технологическими свойствами: твердостью, износостойкостью, теплостойкостью. Улучшение всех перечисленных свойств может быть достигнуто только одним из известных технологических приёмов, а именно упрочнением поверхностного слоя гильзы цилиндра за счёт изменения его химического состава или структуры. Установлено, что перспективным направлением в решении данной проблемы является применение лазерной обработки. Обработка лазерным излучением внутренней поверхности гильзы известна достаточно давно, однако применялась только в качестве упрочнения поверхностного слоя.

В данной работе лазерную обработку рассматриваем в рамках комплексного подхода, который позволяет создать на зеркале гильзы зоны с различными необходимыми параметрами микрорельефа путем оплавления поверхности, при этом обеспечивая необходимые механические свойства рабочей поверхности гильзы. Кроме того, геометрия лазерного луча легко изменяется оптическими системами, обработку внутренней поверхности гильзы можно вести при малом времени теплового воздействия, а значит, и минимальном короблении деталей. Это приводит к экономии энергии, материальных и трудовых ресурсов.

Микропрофилирование внутренней поверхности гильзы. Главной особенностью кинематики ЦПГ можно считать реверсивный характер и синусоидальное изменение скорости движения поршня и поршневых колец относительно цилиндра (с достижением максимума примерно в середине хода поршня и нуля в мертвых точках), поэтому основные детали ЦПГ – цилиндр, поршень и поршневые кольца – работают в режиме трения, представляющем собой изменяющуюся комбинацию гидродинамического, смешанного и граничного трения. Приведенные в работе [2] данные для автомобильного дизеля позволяют составить представление о доле каждого из названных режимов трения в течение рабочего цикла ДВС (табл. 1).

Таблица 1

Доли различных режимов трения элементов цилиндропоршневой группы автомобильного дизеля 8Ч 11/11,5

Элементы ЦПГ	Доля режима трения по отношению ко времени рабочего цикла, %		
	гидродинамический	смешанный	граничный
Поршень	52	39	9
Кольца	29	9	62

При прочих равных условиях в гидродинамическом режиме сила трения приблизительно на два порядка меньше сил граничного и сухого трения. Поэтому основной задачей профилирования является возможность обеспечения гидродинамического (жидкостного) трения на всем пути движения поршня.

О режиме жидкостного трения можно говорить, когда движущиеся поверхности полностью разделены пленкой смазки и непосредственный контакт элементов пары трения отсутствует. Пока такая плен-

ка цела, материал движущихся поверхностей и их шероховатость не имеют значения. Поэтому от микро-рельефа на внутренней поверхности гильзы требуется, чтобы эта пленка сохранялась на всем пути движения поршня, как бы прилипла к внутренней поверхности гильзы, то есть чтобы не было проскальзывания смазки относительно поверхностей.

Можно предположить, что рассмотренные процессы образования несущего масляного слоя в сопряжениях «поршневое кольцо – цилиндр» и «поршень – цилиндр» аналогичны гидродинамическим процессам, возникающим в гидродинамических многоклиновых подшипниках скольжения, где профиль вкладыша или вала имеет форму, отличающуюся от цилиндрической.

Исходя из этого предположения, можно сделать вывод, что обеспечить жидкостное трение в сопряжениях ЦПГ возможно созданием профилированного несущего масляного клина, путем обработки профиля поверхности по математически заданной кривой. Тогда и из решения уравнения Рейнольдса для плоского потока жидкости можно получить выражение для подъемной силы или реакции смазочного материала в зазоре смазываемых деталей сопряжений ЦПГ [3]:

$$P = \mu v \frac{L^2 (H_2 - H_1)}{2H_1^3}. \quad (1)$$

В формуле (1) такие параметры, как μ (коэффициент вязкости, Па·с) и v (скорость движения поршня, м/с), известны из условия работы двигателя и зависят только от его характеристик. Реакция смазочного материала P (Н) равна силе давления поршня во время работы двигателя на стенку гильзы цилиндра. Следовательно, лишь входная H_1 (мм) и выходная H_2 (мм) ширина зазора на шаге L (мм) характеризуют профиль регулярных выступов микро-рельефа, именно их сочетание и численные значения и определяют профилирование. А с учетом того, что выражение $(H_2 - H_1)/H_1$ является относительным перепадом высот δ , выражение (1) можно представить в виде

$$P = \mu v \frac{L^2}{H_1^2} \cdot \frac{\delta}{2}, \quad (2)$$

поэтому расчетная схема (рис. 1) является достаточно простой и может быть представлена в виде горизонтальной плоскости (поршень), движущейся на слое жидкости вдоль наклонной плоскости (цилиндр). Таким образом, получаем сопряжение «поршень – цилиндр с пилообразным микро-рельефом».

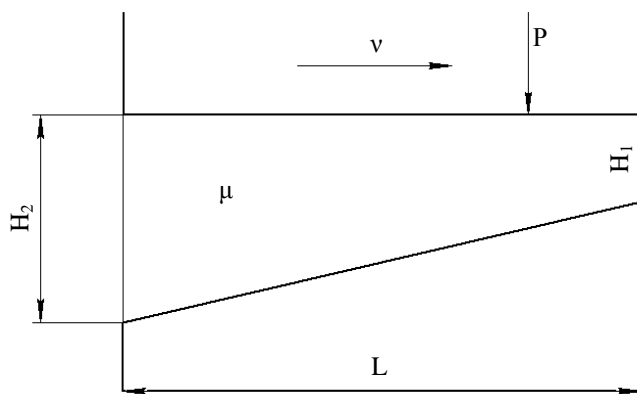


Рис. 1. Характерные параметры несущего профиля

Учитывая реверсивный характер движения поршня относительно внутренней поверхности гильзы, т.е. поршень при перемещении действует на гильзу с боковой силой и в конце каждого хода, переключаясь с ударом о стенку гильзы, меняет направление своего движения. Отсюда выступ микро-рельефа должен иметь две сопряженные наклонные плоскости (рис. 2). При этом высота выступа $H_{t\max}$ (мм) должна обеспечивать необходимый угол подъема наклонной плоскости для создания гидродинамического клина, поддерживающего жидкостное трение на всем пути движения поршня.

Согласно расчетной схеме, чтобы назначить рациональные шаго-высотные параметры микро-рельефа, которые смогут обеспечить минимальную, но достаточную ширину зазора H_1 для обеспечения жидкостного трения, необходимо определить высоту выступа $H_{t\max}$, длину выступа L , длины наклонных

плоскостей на прямом и обратном ходу поршня l_1 (мм) и l_2 (мм) для каждой зоны рабочей поверхности гильзы исходя из условий работы.

Тогда по расчетной схеме (рис. 2) длина выступа микрорельефа L , которая бы обеспечивала гидродинамический клин при реверсивном движении и необходимую маслосъемность поверхности:

$$L = l_1 + l_2. \quad (3)$$

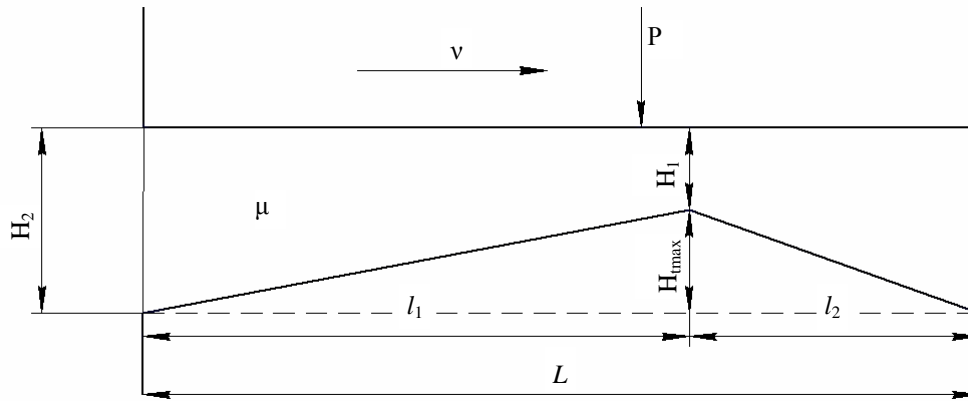


Рис. 2. Расчетная схема для микропрофилирования внутренней поверхности гильзы цилиндра

Учитывая неравномерности распределения сил по тактам рабочего цикла и используя наиболее энергоемкие такты – сжатие и расширение, соотношение работ которых составляет 17 % к 66 % соответственно, можно согласовать соотношение длин наклонных плоскостей l_1 и l_2 по правилу: большей работе должна соответствовать большая длина участка несущего профиля, то есть

$$\left(\frac{l_1}{l_2}\right) = \frac{66}{17}, \quad (4)$$

или, переходя к отношению длин, имеем

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{66}{17}}. \quad (5)$$

Общая длина выступа микрорельефа может быть выражена из уравнения Рейнольдса (2):

$$L = H_1 \sqrt{\frac{2P}{\mu v \delta}}. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что с увеличением толщины масляной пленки H_1 и гидродинамической несущей способности (ГНС) P длина выступа микрорельефа L будет увеличиваться.

Толщина масляной пленки H_1 (входная ширина зазора) должна быть минимальная, но достаточная на всем пути движения поршня для создания режима жидкостного трения при выбранных шаго-высотных параметрах микрорельефа. Для определения ширины входного зазора H_1 было проанализировано большое количество зависимостей на основе расчета силы трения [4] и получено следующее выражение:

$$H_1 = \frac{\mu v S_{кон}}{fP}, \quad (7)$$

где f – коэффициент трения скольжения (для жидкостного трения $f = 0,001 \dots 0,003$); $S_{кон}$ – площадь контакта в сопряжениях ЦПГ, мм².

Для того чтобы толщина слоя смазки имела минимальное, но достаточное значение, при котором несущая способность не уменьшалась и значительно не увеличивалась, необходимо задаться постоянным значением высоты выступа микрорельефа H_1 (мм) по всей длине внутренней поверхности гильзы.

На основании литературных источников [5; 6] было выявлено, что при относительном перепаде высот $\delta = 1,2$ существует такая высота H_{max} , которая создает необходимый угол подъема наклонных плоскостей для создания гидродинамического клина при реверсивном движении поршня, с дальнейшим увеличением гидродинамической несущей способности.

Из выражения

$$\delta = \frac{H_2 - H_1}{H_1} \quad (8)$$

следует, что

$$H_{t \max} = \delta_{\max} H_1. \quad (9)$$

Однако постоянное увеличение ГНС приводит, во-первых, к росту расхода масла, его механического выброса, выгорания и испарения, во-вторых, к увеличению интенсивности контактирования деталей, вызывающей не снижение, а, наоборот, увеличение трения и изнашивания. К тому же пилообразная форма выступов может служить концентраторами напряжений, а в моменты уменьшения скорости движения (вплоть до нуля), они могут быть источниками повышенного изнашивания и возникновения задигов на поверхности поршня и поршневых колец. Поэтому первое приближение к реально существующей форме выступов микрорельефа – наклонные плоскости, сопряженные с плоским участком (рис. 3).

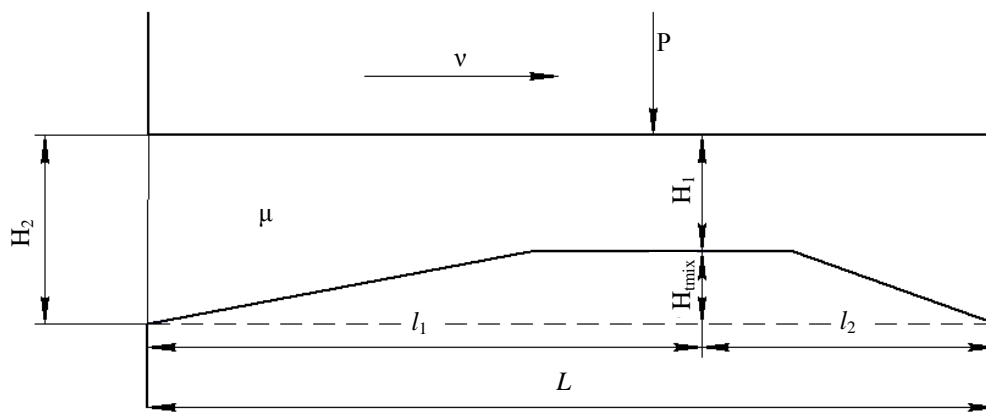


Рис. 3. Профиль выступа микрорельефа

Физический смысл наличия горизонтального удлинения в том, что этот участок призван воспринимать внешнюю нагрузку в моменты уменьшения (вплоть до нуля) скорости движения и поддерживать постоянный гидродинамический клин на всем пути движения поршня с углами подъема наклонных плоскостей, соответствующих высоте выступа $H_{t \max}$.

Из вышесказанного следует, что существует такое значение относительного перепада высот δ_{\min} , при котором параметр H_t должен принимать минимальное, но достаточное значение $H_{t \min}$ (мм) для создания жидкостного трения и обеспечения необходимой маслосъемности поверхности, предполагая минимальную толщину масляной пленки H_1 , то есть

$$H_{t \min} = \delta_{\min} H_1. \quad (10)$$

Тогда существует некоторый абсолютный перепад высот

$$\Delta = H_{t \max} - H_{t \min}. \quad (11)$$

В свою очередь абсолютный перепад высот Δ показывает, во сколько раз можно уменьшить высоту выступа H_t или значение относительного перепада высот, не уменьшив при этом максимальное значение ГНС и не изменив углы подъема наклонных плоскостей:

$$\Delta = \frac{H_{t \min}}{H_{t \max}} = \frac{\delta_{\min}}{\delta_{\max}}. \quad (12)$$

И с учетом выражений (9), (10) и (12) найдем $H_{t \min}$ по следующей формуле:

$$H_{t \min} = \frac{\delta_{\max} H_1^2}{\delta_{\max} H_1 + 1}. \quad (13)$$

Таким образом, решение системы из 5-ти уравнений ((3), (5), (6), (7), (13)) позволит определить основные соотношения шаго-высотных параметров микрорельефа, которые обеспечивают создание режима жидкостного трения в сопряжениях ЦПГ с минимальной, но достаточной маслосъемностью поверхности.

Технология нанесения выступов микрорельефа по расчетным шаго-высотным параметрам.

Комплексный подход предполагает нанесение микрорельефа лазерным излучением с последующей механической обработкой.

Быстрая кристаллизация из расплава, образованного высокоэнергетическими потоками (лазерные лучи), открывает новые возможности при поверхностной обработке деталей и позволяет получить как качественно иные структурные состояния в сплавах, так и микропрофиль любой сложности. При разработке технологии нанесения микрорельефа на внутреннюю поверхность гильзы с помощью лазерного излучения необходимо определить влияние энергетических характеристик лазерной обработки на размер зоны лазерного воздействия, а также ряда технологических параметров.

На размеры зоны обработки лазерным излучением будут влиять, во-первых, теплофизические величины: температура плавления материала T_{lig} (К), его теплопроводность λ_T (Вт/м·К), температуропроводность α (м²/с), плотность ρ (кг/м³), удельная теплоемкость материала (Дж/г·К); во-вторых, параметры лазерного технологического процесса: мощность излучения P_o (Вт); плотность потока, падающего на поверхность вещества q_s (Вт/м²); диаметр лазерного пучка на поверхности образца d_b (мм); скорость движения источника (м/с); длительность лазерного импульса τ_i (с). Для каждой конкретной марки металла теплофизические величины известны. Из оставшихся пяти параметров любые два являются независимыми и определяют значения оставшихся трех.

При определенных плотностях потока лазерного излучения ($q_s = 10^5 \dots 10^7$ Вт/см²) возникает только проплавление поверхностного слоя без последующего разрушения [7]. Движение расплава почти отсутствует. После окончания воздействия лазерного излучения расплав застывает, лунка не образуется, а, наоборот, профиль обработки выступает над поверхностью и имеет форму сферического сегмента.

Для определения параметров лазерного излучения воспользуемся [7; 8] уравнением теплового баланса:

$$AW_0 = W_T, \quad (14)$$

где W_T – теплосодержание разогретого объема вещества (Дж); W_0 – энергия источника теплоты, выделившаяся в объеме (Дж); A – поглощательная способность поверхностного слоя материала (%).

При этом энергию источника теплоты, выделившуюся в объеме, можно представить в виде

$$W_0 = q_s \tau_i \cdot \frac{\pi d_b^2}{4}. \quad (15)$$

С помощью уравнения теплового баланса можно определить количественную связь между глубиной прогрева до заданной температуры и параметрами лазерного излучения. При нагреве материала до температур, больших, чем температуры плавления, теплосодержание в объеме вещества определяется как [7]

$$W_T = \rho [c(T_{lig} - T_0)] \cdot \frac{\pi d_b^2 \cdot z_{lig}}{4}, \quad (16)$$

где T_0 – температура поверхности до воздействия лазерного излучения (К); z_{lig} – глубина проплавленного слоя (мм).

С учетом радиального распространения тепла $d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i}$ [7] будет определяться как

$$W_T = \rho [c(T_{lig} - T_0)] \cdot \frac{\pi (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i}) \cdot z_{lig}}{4}. \quad (17)$$

Из выражения (17) можно при известной энергии лазерного импульса W_0 , длительности импульса τ_i и размере пятна фокусировки d_b определить глубину проплавления z_{lig} :

$$z_{lig} = \frac{4AW_0}{\rho [c(T_{lig} - T_0)] \cdot \pi (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i})^2}. \quad (18)$$

С учетом выражения (15) уравнение (18) приобретает следующий вид:

$$z_{lig} = \frac{q_s A \tau_i d_b^2}{\rho [c(T_{lig} - T_0)] \cdot (d_b + 2\sqrt{\alpha\tau_i})^2}. \quad (19)$$

Для приближенного определения глубины слоя, прогретого до температуры плавления T_{lig} при лазерном нагреве поверхности металла, принимая во внимания данные литературных источников [7; 8], используется следующая формула:

$$z_{lig} = 2\sqrt{\frac{\alpha\tau_i}{\pi} - \frac{T_{lig}\lambda_T}{q_s}}. \quad (20)$$

Знание температурного поля материала при воздействии излучения лазера позволяет определить критические плотности потока, требуемые для достижения за данный промежуток времени в некоторой точке поверхности или объема материала заданной температуры. Используя одномерную модель нагрева полубесконечного тела $2\sqrt{\alpha\tau_i} \ll d_b$ тепловым источником с постоянной во времени плотностью потока, можно получить соотношения для расчета интенсивности, требуемой для достижения на поверхности температуры плавления [7]:

$$q_s^{lig} = \frac{0,885T_{lig}\lambda_T}{A\sqrt{\alpha\tau_i}}. \quad (21)$$

При движущемся источнике теплоты (поверхность или пучок движутся) теплосодержание в объеме определяется как [7; 9]

$$W_i = Vc\rho\Delta T = c\rho\tau_i v_{лаз} d_b z_T \Delta T. \quad (22)$$

Уравнение баланса в этом случае имеет вид (с учетом радиального расширения тепла) [7]:

$$A\frac{W_T}{\tau_i} = c\rho v_{лаз} (2\sqrt{\alpha\tau_i} + d_b) z_T \Delta T. \quad (23)$$

При высоких плотностях потока и в случае движущегося источника теплоты может осуществиться плавление и испарение вещества. Соответственно, уравнение баланса для режима плавления будет иметь следующий вид:

$$AP_0 = \rho v_{лаз} z_{lig} (2\sqrt{\alpha\tau_i} + d_b) \rho [c(T_{lig} - T_0)]. \quad (24)$$

Из выражения (24) можно вычислить скорость движения лазерного пучка по поверхности металла, зная глубину проплавленного слоя z_{lig} (выражение (20)).

$$v_{лаз} = \frac{A \cdot P_0}{\rho z_{lig} (2\sqrt{\alpha\tau_i} + d_b) \rho [c(T_{lig} - T_0)]}. \quad (25)$$

Выражение (25) справедливо в режиме непрерывного излучения лазера с мощностью P_0 . В этом случае время воздействия определяется как

$$\tau_i = \frac{d_b}{v_{лаз}}. \quad (26)$$

После окончания воздействия лазерного излучения расплав застывает, а профиль обработки имеет форму сферического сегмента. Сферический сегмент, полученный в результате проплавления поверхности, имеет поперечный размер, равный диаметру лазерного луча d_b . Высоту сегмента h (мм) можно найти по известной формуле:

$$h = R - \sqrt{R^2 - r_b^2}. \quad (27)$$

Здесь R – радиус условной сферы (мм), изображенной на рисунке 4.

При обработке с проплавлением поверхности геометрия нагрева материала имеет вид (рис. 5) [9]. В случае если диаметр пятна много больше, чем толщина прогретого слоя, этот слой имеет форму цилиндра. При этом высота получаемого цилиндра равна толщине проплавленного слоя z_{lig} . Тогда радиус условной сферы R можно найти по формуле:

$$R = \theta z_{lig}, \quad (28)$$

где θ – коэффициент пропорциональности, который зависит от материала и определяется эмпирически.

При оплавлении поверхности толщина проплавленного слоя находится из выражения (20) и (21):

$$z_{lig} = 1,13\sqrt{\alpha\tau_i}(1 - A). \tag{29}$$

Уравнение (27) приобретает следующий вид:

$$h = \theta \cdot 1,13\sqrt{\alpha\tau_i}(1 - A)\sqrt{(\theta \cdot 1,13\sqrt{\alpha\tau_i}(1 - A))^2 - r_b^2}. \tag{30}$$

Эта высота сферического сегмента h будет равна высоте выступа микрорельефа H_f . Размер поперечного сечения сегмента равен диаметру лазерного луча d_b .

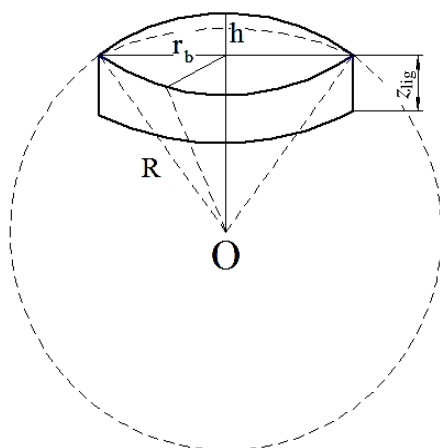


Рис. 4. Условная сфера для определения R

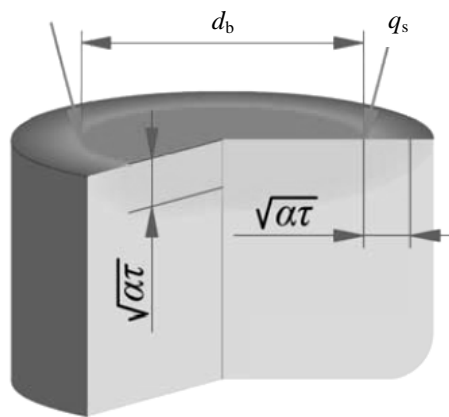


Рис. 5. Форма прогреваемого объема материала при воздействии широким лазерным пучком

Таким образом, чтобы получить выступ микрорельефа определенной высоты и диаметра из выражений (21), (25), (26) и (30), нужно найти параметры лазерного технологического процесса.

Способ нанесения выступов микрорельефа на внутреннюю поверхность гильзы. На основании полученных закономерностей был разработан способ нанесения выступов микрорельефа на внутреннюю поверхность гильзы лазерным излучением с последующей механической обработкой. Получение выступов профиля предполагает обработку внутренней поверхности гильзы по диаметру цилиндра лазерным излучением с проплавлением перекрывающимися дорожками с разной высотой оплава (рис. 6, а) с последующим их хонингованием до высоты выступа H_{min} (рис. 6, б).

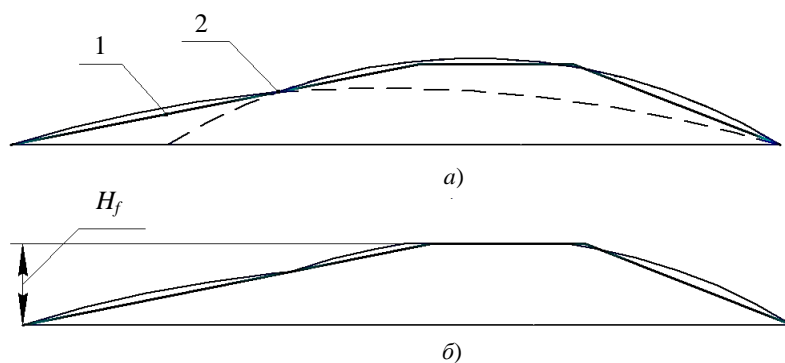


Рис. 6. Профиль выступа после оплавления поверхности (а):
1 – контур, заданный математической кривой; 2 – контур, полученный перекрывающимися дорожками;
профиль выступа после оплавления с последующим хонингованием (б)

Профиль выступа микрорельефа с заданными шаго-высотными параметрами можно получить, если обработку вести в следующей последовательности:

1) первоначально получить выступ высотой H_m (мм) и шириной w (мм), равной диаметру лазерного луча d_b . В свою очередь, ширина w равна длине выступа микрорельефа L , которая обеспечивает гидродинамический клин и необходимую маслоемкость поверхности (рис. 7);

2) учитывая соотношение длин l_1 и l_2 , необходимое для обеспечения гидродинамического клина при реверсивном движении, дальнейшее оплавление выступа ведется перекрывающей дорожкой на высоту H_{tmax} , которая обеспечивает нужный угол подъема наклонных плоскостей. При этом ширина дорожки $w_1 = L/2$ (рис. 8). Обработка ведется с нижнего края первоначального выступа микрорельефа относительно расположения гильзы в корпусе двигателя по диаметру внутренней поверхности гильзы с соответствующими характеристиками лазерного технологического процесса;

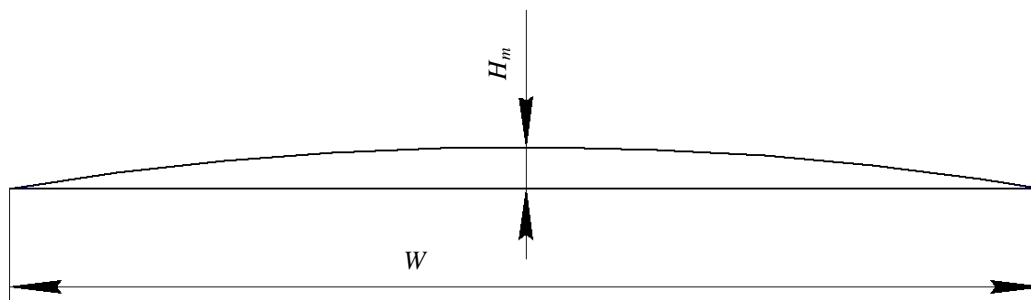


Рис. 7. Первоначальный профиль выступа микрорельефа

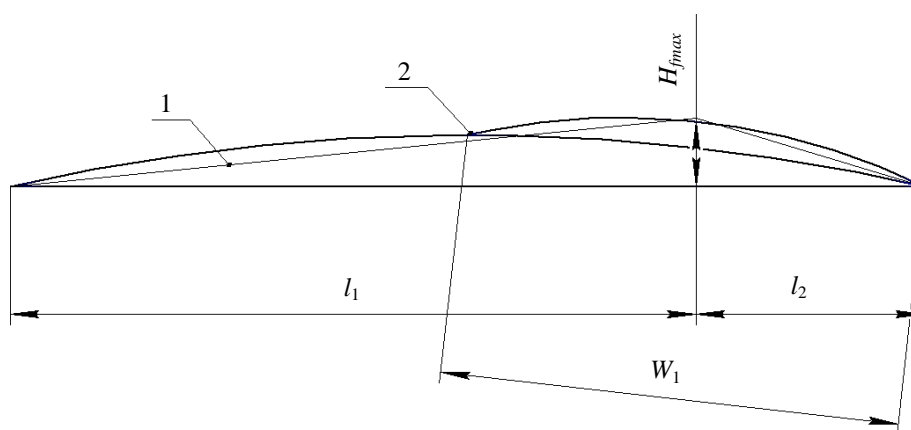


Рис. 8. Профиль выступа:

1 – контур, заданный математической кривой;

2 – контур, полученный перекрывающимися дорожками после оплавления поверхности

3) для создания жидкостного трения и обеспечения необходимой маслосъемности поверхности важным является также конечное значение высоты выступа микрорельефа. Поэтому последняя стадия обработки – это хонингование полученного лазерным оплавлением микрорельефа до высоты H_{tmin} (рис. 9). К тому же механическая обработка микрорельефа позволяет создать плоскость, параллельную направлению движения поршня, которая обеспечивает непрерывность слоя смазки и восприятия внешней нагрузки в моменты уменьшения (вплоть до нуля) скорости движения поршня.

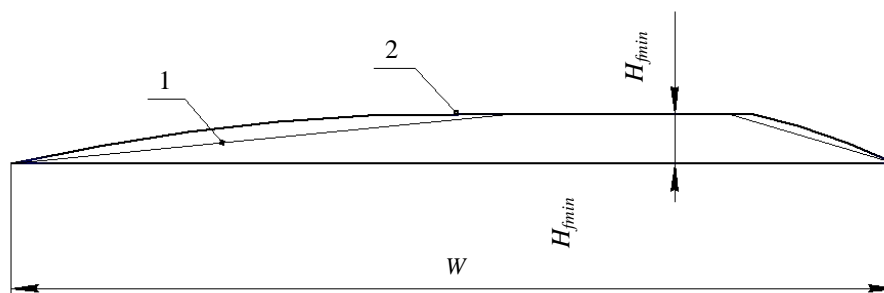


Рис. 9. Профиль выступа после оплавления лазерным излучением с последующим хонингованием:

1 – контур, заданный математической кривой;

2 – контур после предложенного способа обработки

Заключение. В результате проведенных исследований разработан способ нанесения микрорельефа на внутреннюю поверхность гильзы, который включает образование выступов оплавлением поверхности лазерным излучением с последующим хонингованием выступов микрорельефа до необходимой высоты. Определены с точки зрения максимизации гидродинамической несущей способности шаговысотные параметры микрорельефа, которые могут обеспечить минимальную, но достаточную ширину зазора в сопряжениях ЦПГ для обеспечения жидкостного трения.

Исследованы тепловые процессы лазерной обработки и установлены закономерности между параметрами микрорельефа и режимами лазерной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шляхтов, В.А. Снижение износа цилиндропоршневой группы дизелей / В.А. Шляхтов // Энергодиагностика: междунар. конф. – М., 1995. – Т. 3. – С. 51.
2. Дьяченко, Н.Х. Теория двигателей внутреннего сгорания / Н.Х. Дьяченко, А.К. Костин, Г.В. Мельников. – М.: Машиностроение, 1965. – 457 с.
3. Дерягин, Б.В. Применение обобщенного закона трения к граничной смазке и механическим свойствам смазочного слоя / Б.В. Дерягин, В.П. Лазарев // Труды II конф. по трению и износу в машинах. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. 3. – С. 43–55.
4. Боуден, Ф. Трение и смазка твердых тел / Ф. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 503 с.
5. Путинцев, С.В. Гидродинамическое исследование и выбор параметров микрорельефа цилиндра двигателя / С.В. Путинцев, С.А. Аникин // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». Спец. вып. «Энергетическое и транспортное машиностроение». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 14–20.
6. Путинцев, С.В. Гидродинамическое исследование и выбор параметров микрорельефа цилиндра двигателя / С.В. Путинцев, П.Н. Антонюк, С.П. Чирский // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – С. 92–98.
7. Лосев, В.Ф. Физические основы лазерной обработки материалов: учеб. пособие / В.Ф. Лосев, Е.Ю. Морозова, В.П. Ципилев; Томск. политехн. ун-т. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 199 с.
8. Майоров, В.С. Исследование структуры и свойств сплавов при лазерной обработке и разработка технологии упрочнения промышленных изделий / В.С. Майоров, А.Н. Сафонов, В.М. Тарасенко // Применение лазеров в народном хозяйстве. Всесоюзная конференция: тез. докл. – Звенигород, 1985. – С. 156–159.
9. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 634 с.

Поступила 18.12.2014

CREATING MICRORELIEF ON THE INNER SURFACE OF THE CYLINDER LINER BY LASER RADIATION

V. KOSTRITSKI, A. LISOVSKI, A. DUDAN

Defined in terms of maximizing the hydrodynamic bearing capacity, stepper-altitude settings microrelief that can provide a minimum but sufficient width of the gap in the cylinder group mates for fluid friction; investigated the thermal processes of laser processing and correlations between parameters and modes microrelief laser treatment. The studies developed a method of applying the microrelief on the inner surface of the sleeve, which involves the formation of protrusions surface melting laser radiation followed by honing projections microrelief to the desired height.

УДК 66.013.8

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ,
ВОЗНИКАЮЩЕЙ ПРИ РАБОТЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ****д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; В.А. ДРОНЧЕНКО**
(Полоцкий государственный университет)

Исследуется процесс приготовления водной эмульсии с заранее заданными свойствами на основе отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств с помощью ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя. Рассмотрена общая постановка задачи о развитии сферической ударной волны в ограниченном пространстве. Представлена математическая модель точечного взрыва в емкости для приготовления эмульсии ударно-волновым способом. Проанализированы методы расчета параметров ударной волны.

Введение. В Полоцком государственном университете проводятся исследования с целью разработки технологии приготовления мелкодисперсной эмульсии с высокой стабильностью из отработавших нефтесодержащих веществ и растворов технических моющих средств. Полученная эмульсия заменяет товарный эмульсол для смазки форм при производстве железобетонных изделий [1–3]. Во время приготовления эмульсии поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей разрушаются под воздействием ударных волн, возникающих при работе пневматического излучателя. Использование этой технологии позволит решить проблему охраны труда и здоровья работников предприятий от вредного воздействия токсичных и пожароопасных материалов.

При больших объемах производства эмульсии при помощи пневматического излучателя целесообразно изготавливать специальные установки для производства. При мелкотоварном производстве можно использовать различные, подходящие по размеру и конструктивным особенностям свободные емкости (например, резервуары для хранения сыпучих веществ или ванны моечных машин) после тщательной очистки загрязненных поверхностей. Срабатывание пневмокамеры пневматического излучателя оказывает вибрационное воздействие на раствор, а также вызывает пульсации газовой полости, образующейся в жидкости.

Дальнейшее развитие технологий, связанных с использованием пневматического излучателя, требует теоретического исследования процесса развития ударной волны, возникающей при работе этого излучателя. Цель данной работы – разработать математическую модель процесса развития ударной волны, возникающей при работе пневматического излучателя в емкости.

Общая постановка задачи и методы решения. Представим выхлоп сжатого воздуха из камеры пневматического излучателя как точечный взрыв и будем исследовать задачу об этом взрыве в емкости. Основу математической модели составляет задача о точечном взрыве в безграничном пространстве [4–9].

Рассматривается нестационарное движение идеального газа, вызванное расширением объема V_0 газа, первоначально сжатого до давления p_0 , в емкости с жесткими стенками. В этом случае в газе, занимающем объем емкости, сразу сформируется ударная волна с параметрами: R_1 – текущая координата фронта ударной волны; p_1 – давление во фронте ударной волны; v_1 – скорость фронта ударной волны.

Ставится задача – исследовать развитие сферической ударной волны в ограниченном пространстве. Задача одномерная и неавтономная. Неавтономным параметром является в этом случае противодействие p_a . Пренебречь противодействием p_a в данной задаче не представляется возможным ввиду малого значения величины энергии E_0 , и как следствие, $p_1/p_a \rightarrow 1$. Задача о точечном взрыве с противодействием до настоящего времени не имела точного аналитического решения, а решалась численно с применением методов конечных разностей. Применение данных методов, как выяснилось, является неоправданно громоздким и трудоемким. Поэтому нами предлагается использовать новый метод решения задачи, отличающийся простотой и точностью, достаточной для инженерных расчетов. Путем ряда преобразований задача приводится к виду, пригодному для решения с использованием метода Рунге – Кутты второго порядка.

При исследовании следует учитывать, что при распространении ударной волны в емкости в движение будут вовлекаться все новые области, занятые газом, пока ударная волна не будет взаимодействовать с какой-либо стенкой. У стенки емкости генерируется своя ударная волна, для определения которой необходимо знать параметры отраженной от стенки ударной волны p_1^* .

Основная часть. Существенное упрощение поставленной задачи возможно при определенных соотношениях геометрических параметров емкости [6–9]:

- емкость открыта с торца, поэтому целесообразно пренебречь эффектами вторичных отражений ударных волн, а учитывать только первое отражение волны;

- мелкая емкость – можно считать, что пневматический излучатель установлен на дне емкости, а взрыв происходит на поверхности полупространства;

- цилиндрическая емкость, диаметр которой значительно меньше ее длины, – при установке пневматического излучателя у одного из торцов емкости в ней будет распространяться плоская ударная волна. В этом случае задача автоматически сводится к задаче о «плоском поршне», причем сразу можно предположить, что расположение пневматического излучателя у одного из торцов является оптимальным;

- если все значения габаритных размеров емкости приблизительно одинаковые – при решении будем считать, что ударная волна достигает всех точек внутренней поверхности емкости почти одновременно, поэтому можно рассматривать только первую фазу взаимодействия ударной волны со стенкой, так как в этот момент давление и скорость газа в ударной волне будут наибольшими. Можно предположить, что фронт ударной волны будет перпендикулярен к поверхности стенки во всех точках емкости.

Анализ задачи показал, что ее можно разделить на три части: 1) определение параметров газа во фронте ударной волны, распространяющейся в емкости; 2) взаимодействие ударной волны со стенкой емкости, определение параметров отраженной ударной волны; 3) определение параметров ударных волн, генерируемых в стенке емкости или нестационарных движений стенок емкости как упругой оболочки.

Рассмотрим задачу о взрыве заряда в идеальном газе и определим начальные и граничные условия. Под зарядом понимается объем V_0 первоначально сжатого газа с давлением p_0 . Газ первоначально занимает сферический объем радиусом R_0 , а затем расширяется по закону:

$$pV^\gamma = const,$$

где γ – показатель адиабаты газа.

Предельный объем, занятый этим газом, будет V_a , а его давление при этом упадет до атмосферного p_a . В этом случае получаем

$$p_a V_a^\gamma = p_0 V_0^\gamma$$

или при сферическом взрыве

$$\frac{R_a}{R_0} = \left[\left(\frac{p_0}{p_a} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\frac{1}{3}},$$

где R_a – радиус предельного объема, занятого газом.

При работе пневматического излучателя максимальный объем газа будет в 3...4 раза больше первоначального. Так как значение величины R_a значительно меньше значений габаритных размеров емкости, то можно пренебречь эффектом подпора от расширяющего газа и рассматривать задачу как точечный взрыв, но при этом следует определить начальные параметры ударной волны не при координате фронта ударной волны $R_1 = 0$, а при $R_1 = R_0$, так как в теории точечного взрыва при $R_1 \rightarrow 0$ параметры ударной волны следующие: давления p_1 и скорости фронта $v \rightarrow \infty$. Таким образом, при времени $t = 0$ $R_1 = R_0$, $p_1 = p_0$, $E_0 = p_0 V_0$.

Граничные условия во фронте ударной волны следующие:

$$\rho_1 = \frac{\gamma+1}{\gamma-1+2k} \rho_a,$$

$$p_1 = \frac{2\gamma-(\gamma-1)}{(\gamma+1)k} p_a,$$

$$\left(\frac{dr}{dt} \right)_{R_1} = \frac{2}{(\gamma+2)(1-k)R_1},$$

где ρ_1 и $\left(\frac{dr}{dt} \right)_{R_1}$ – плотность и скорость газа за фронтом ударной волны; $k = \frac{a}{v^{\frac{1}{\gamma}}}$, $a = \left[\frac{\gamma p_1}{\rho_0} \right]^{\frac{1}{2}}$ – скорость

звука в невозмущенном газе.

Исходя из вышеизложенного можно определить начальную скорость движения фронта ударной волны v_{l_0}

$$v_{l_0} = a \left[\frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{\gamma + 1}{2\gamma - (\gamma - 1)} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

После определения начальных и граничных условий исследуем распространение сферической ударной волны в открытой емкости. Необходимо знать параметры ударной волны, распространяющейся в емкости (это давление во фронте ударной волны p_1 , плотность ρ_1 , зависимость данных параметров от текущей координаты фронта ударной волны R_1). Эти параметры можно найти из решения задачи о точечном взрыве энергией E_0 в идеальном газе с начальным давлением p_a и плотностью ρ_a [3–5].

Рассмотрим дифференциальные уравнения движения и неразрывности, описывающие одномерное движение идеального газа при сферическом взрыве в лагранжевой системе координат [2; 3]:

$$\begin{cases} \frac{\rho_a}{\rho} = \frac{r_2}{\xi} = \frac{dr^2}{d\xi}; \\ \frac{dp}{d\xi} = \pm \frac{\rho_a \xi^2}{r^2} \left(\frac{d^2 r}{dt^2} \right); \\ \frac{dS}{dt} = 0, \end{cases}$$

где r – эйлерова координата выделенной частицы среды, показывающая текущее положение частицы относительно центра симметрии; ξ – лагранжева координата частицы среды, представляющая собой начальное положение частицы газа относительно центра симметрии; S – энтропия частицы среды; $r = \xi + u$; u – перемещение частицы за время t .

При $\xi = 0$ и $r = 0$

$$\left(\frac{dr}{dt} \right)_{\xi=0} = \frac{2}{\gamma 1} (1 - k) R_{l_0},$$

где $\frac{dr}{dt}$ – массовая скорость газа за фронтом ударной волны.

Из определения лагранжевой и эйлеровой координат частицы среды следует, что данные координаты будут равны на фронте ударной волны $\xi = r = R_1$.

Добавим интегральное уравнение сохранения энергии [4; 5]:

$$\int_0^{R_1} \varepsilon \rho^2 r^2 dr + \frac{1}{2} \int_0^{R_1} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \rho r^2 dr = \frac{E_0}{4\pi},$$

где ε – удельная энергия газа единицы объема, $\varepsilon = \frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{p - p_0}{\rho}$.

С учетом последнего получим

$$\int_0^{R_1} \frac{p + p_0}{\gamma - 1} r^2 dr + \frac{1}{2} \int_0^{R_1} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \rho r^2 dr = \frac{E_0}{4\pi}.$$

Таким образом, имеются все уравнения и условия для того, чтобы решить задачу. Нами специально разработан метод, заключающийся в следующем. Предположим, что известна функция, связывающая какую-нибудь зависимую переменную с независимой переменной. Тогда можно перейти от частных к простым производным и проинтегрировать их. Пусть известна зависимость, связывающая эйлерову координату r в уравнениях с лагранжевой координатой ξ :

$$r = f(\xi).$$

Рассмотрим функцию $\frac{r}{R_1} = f_1\left(\frac{\xi}{R_1}\right)$.

Известно, что $r = \xi + u$, а перемещение u зависит от интенсивности ударной волны и по мере ее затухания стремится к нулю. Тогда в пределе, когда скорость фронта ударной волны R_1 стремится к скорости звука a в среде, перемещение u стремится к нулю, эйлера координата r стремится к лагранжевой ξ , а график функции r/R вырождается в прямую линию.

Таким образом, нам необходимо подобрать функцию, аппроксимирующую реальную зависимость $\frac{r}{R_1} = f_1\left(\frac{\xi}{R_1}\right)$ с наименьшей погрешностью ξ .

Предположим, что имеется зависимость $\frac{r}{R_1} = f_2\left(\frac{\xi}{R_1}\right)$, аппроксимирующая реальную зависимость $\frac{r}{R_1} = f_1\left(\frac{\xi}{R_1}\right)$. Причем значения функций f_1 и f_2 , а также значения их первых производных $\frac{df_1}{d\xi}$ и $\frac{df_2}{d\xi}$ равны в точках графика функции r/R_1 , выраженного прямой линией. Тогда $|f_1 - f_2| \leq \varepsilon$, где ε – малая первого порядка.

Если воспользоваться интегральным соотношением, в которое входит функция $r(\xi)$, можно записать

$$\left| \int_0^{R_1} \varphi(f_1) d\xi - \int_0^{R_1} \varphi(f_2) d\xi \right| \leq \varepsilon^2,$$

где ε^2 – малая второго порядка.

Используя это свойство аппроксимирующей функции, подберем функцию f_2 в виде

$$\frac{r}{R_1} = \varphi_1(t) + \varphi_2(t) \left(\frac{\xi}{R_1}\right)^{\varphi_3(t)},$$

где $\varphi_i(t)$ – произвольная функция времени; i – номер функции.

По условию симметрии:

$$\begin{cases} r = \xi = R_1, \\ r = \xi = 0; \end{cases}$$

$$\varphi_1(t) = 0;$$

$$\varphi_2(t) = 1.$$

Таким образом, искомая аппроксимирующая функция

$$r = R_1 \frac{\xi}{R_1}^{\varphi_3(t)}.$$

Найдем функцию $\varphi_3(t)$. Продифференцируем по времени и получим

$$\left(\frac{dr}{dt}\right) = v_1 \left(\frac{\xi}{R_1}\right)^{\varphi_3(t)} \left[R_1 \frac{d\varphi_3(t)}{dR_1} + 1 - \varphi_3(t) \frac{\xi}{R_1} \right].$$

Сопоставим полученное уравнение с граничными условиями для массовой скорости за фронтом ударной волны

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_{R_1} = \frac{2}{(\gamma+1)(1-k)v_1}.$$

Получим

$$\varphi_3(t) = \frac{\gamma - 1 + 2k}{\gamma + 1}.$$

Таким образом, аппроксимирующая функция имеет вид:

$$r = R_1 \left(\frac{\xi}{R_1} \right)^{\frac{\gamma - 1 + 2k}{\gamma + 1}}.$$

Подставим функцию в интегральное соотношение энергии, но для этого преобразуем его с учетом уравнения неразрывности к следующему виду

$$\rho_a \xi^2 d\xi = \rho r^2 dr,$$

$$\frac{d}{dt} \int_0^{R_1} r \left(\frac{dr}{dt} \right) \xi^2 d\xi + \frac{3\gamma - 5}{2} \int \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \xi d\xi = \frac{3E_0(\gamma - 1)}{4\pi\rho_a}.$$

В результате получим дифференциальное уравнение

$$2v_1 \frac{d}{dR_1} \left\{ \frac{v_1 R_1^4}{5\gamma + 1 + 4k} \left(1 - k - \frac{(\gamma + 1)R_1}{5\gamma + 1 + 4k} \frac{dk}{dR_1} \right) \right\} + \frac{2(3\gamma - 5)}{\gamma + 1} \cdot \frac{v_1^2 R_1^3}{3\gamma + 1 + 4k} \times \\ \times \left\{ (1 - k)^2 - \frac{2(\gamma + 1) \cdot (1 - k)R_1}{5\gamma + 1 + 4k} \frac{dk}{dR_1} + \frac{2(\gamma + 1)^2}{(5\gamma + 1 + 4k)^2} \left(R_1 \frac{dk}{dR_1} \right) \right\} = \frac{3E_0(\gamma - 1)}{4\pi\rho_a}.$$

Перейдем к безразмерной переменной

$$x = R_1 \left[\frac{\rho_a \alpha^2}{E} \right]^{\frac{1}{3}}$$

и получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$2x \frac{d}{dx} \left\{ \frac{1}{5\gamma + 1 + 4k} \left(1 - k - \frac{(\gamma + 1)x}{5\gamma + 1 + 4k} \frac{dk}{dx} \right) \right\} + \frac{1}{5\gamma + 1 + 4k} \left(1 - k - \frac{(\gamma + 1)x}{5\gamma + 1 + 4k} \frac{dk}{dx} \right) \left(8 - \frac{x}{k} \frac{dk}{dx} \right) + \\ + \frac{2(3\gamma - 5)}{(\gamma + 1)(5\gamma + 1 + 4k)} + \left\{ (1 - k)^2 - \frac{2(\gamma + 1) \cdot (1 - k)x}{5\gamma + 1 + 4k} \frac{dk}{dx} + \frac{2(\gamma + 1)^2}{(5\gamma + 1 + 4k)^2} \left(x \frac{dk}{dx} \right)^2 \right\} = \frac{3(\gamma - 1)k}{4\pi x^3}.$$

После интегрирования уравнения методом Рунге – Кутты второго порядка можно получить функцию $k(x) = \frac{\alpha^2}{v_1^2}$, закон движения фронта волны, давление $p_1(R_1)$, а также плотность $\rho_1(R_1)$ за фронтом ударной волны.

Заключение. Представлена теоретическая модель процесса, протекающего при приготовлении эмульсии с помощью пневматического излучателя. Рассмотрена общая постановка задачи о развитии сферической ударной волны, возникающей при работе пневматического излучателя, в ограниченном пространстве. Предложены упрощения поставленной задачи в зависимости от соотношения геометрических параметров емкости, в которой работает пневматический излучатель. Для решения поставленной задачи использован новый метод, заключающийся в том, что в результате ряда преобразований задача была приведена к виду, пригодному для расчета с использованием метода Рунге – Кутты второго порядка с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

Результаты проведенного теоретического исследования позволят оптимизировать технологию изготовления эмульсии с заранее заданными свойствами на основе отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств с помощью пневматического излучателя, что в свою

очередь будет способствовать решению проблемы охраны труда и защиты здоровья работников предприятий от воздействия отработавших нефтесодержащих продуктов и растворов технических моющих средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дронченко, В.А. Рециклинг жидких производственных отходов, содержащих нефтепродукты / В.А. Дронченко // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: тр. второй науч.-техн. конф.; под ред. А.И. Свириденка. – Гродно, 1997. – Ч. II. – С. 308–311.
2. Дронченко, В.А. Технология производства водомасляной эмульсии с заранее заданной стабильностью на основе отработанных нефтепродуктов / В.А. Дронченко // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии: тез. докл. третьей науч.-техн. конф. – Гродно, 1998. – С. 274–275.
3. Kuzmich, R. Emulsol on the basis of used oil product / R. Kuzmich, A. Maksimchuk, V. Dronchenko // National and European dimension in research: Materials of junior researches III conf.: in 3 parts. – Novopolotsk, PSU, 2011. – Part 1. Tecnology. – P. 40–41.
4. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
5. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учеб. пособие: в 10 т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – Т. VI: Гидродинамика. – 736 с.
6. Brode, H.L. Blast wave from spherical charge / H.L. Brode // Phys. Fluids. – 1959. – Vol. 2, № 2.
7. Sterhlow, R.A. The Blast Wave Generated by Spherical Flame / R.A. Sterhlow, R.T. Luckritz, A.A. Adamzryk // Comb. and Flame. – 1979. – № 35.
8. Физика взрыва: в 2 т. / Л.П. Орленко [и др.]; под ред. Л.П. Орленко. – М.: Физматлит – 2002. – Т. 1. – 832 с.
9. Физика взрыва / Ф.А. Баум [и др.]; под ред. Ф.А. Баума. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

Поступила 12.01.2015

MODELLING OF A SHOCK WAVE DEVELOPMENT PROCESS ARISING AT OPERATION OF PNEUMATIC EMITTER

V. IVANOV, V. DRONCHENKO

The process of preparing an aqueous emulsion with preset properties on the basis of the exhaust oily products and solutions, technical detergents using shock waves arising at operation of pneumatic emitter is investigated. General problem of the development of a spherical shock wave in a confined space is considered. A mathematical model of a point explosion in the tank for the preparation of an emulsion by shock-wave method is given. The methods of calculating the parameters of the shock wave are analyzed.

УДК 631.3.004.67:621.928.37

ОЧИСТКА МОЮЩИХ РАСТВОРОВ УПРАВЛЯЕМЫМ ТРЕХПРОДУКТОВЫМ ГИДРОЦИКЛОНОМ

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

Теоретически и экспериментально определены рациональные параметры и режимы работы управляемого трехпродуктового гидроциклона предложенной конструктивной схемы. Теоретически и экспериментально обоснована возможность управления выводом загрязнений из гидроциклона посредством регистрации электрического сопротивления жидкости в зоне накопления нефтепродуктов. Выявлены закономерности изменения сопротивления моющего раствора в зависимости от концентрации нефтепродуктов и температуры. Определена экономическая эффективность применения трехпродуктового гидроциклона для очистки моющих растворов на ремонтном предприятии.

Введение. Современная технология ремонта машин предусматривает на разных стадиях очистку машин и их составных частей от загрязнений. Большинство очистных операций на ремонтных предприятиях проводят в моечных машинах с применением водных растворов синтетических моющих средств (СМС). По мере использования такие растворы насыщаются твердыми загрязнениями и нефтепродуктами, смыаемыми с поверхностей очищаемых объектов, что приводит к потере моющей способности и необходимости смены растворов.

Один из основных способов экономии моющих растворов – очистка их с целью повторного использования. Наиболее простыми и высокопроизводительными устройствами, применяющимися для активной очистки жидкостей, являются гидроциклоны.

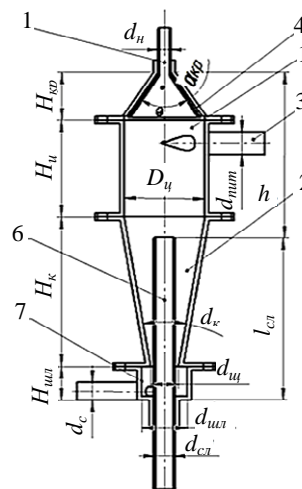
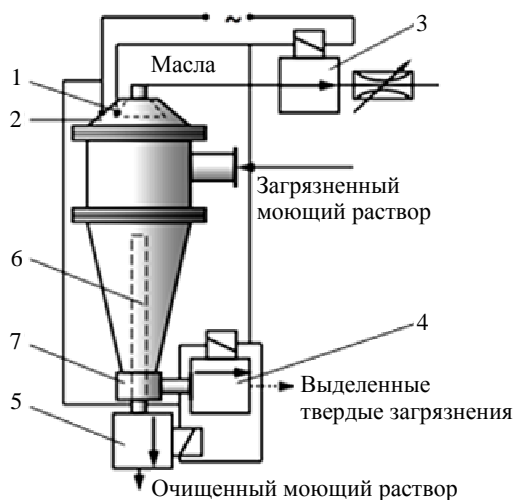
Исследования по очистке моющих растворов от твердых загрязнений выполнялись в ГОСНИТИ А.Ф. Тельновым и Б.Б. Нефедовым [1]. Последние исследования были выполнены А.Л. Казаковым в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии с использованием регулируемого гидроциклона [2]. Однако ими рассмотрен процесс очистки моющих растворов только от твердых загрязнений, хотя по мере использования таких растворов в них накапливаются и нефтепродукты. Наличие последних приводит к снижению качества очистки деталей. Помимо этого, в моечных машинах при перемешивании моющего раствора оставшиеся в нем нефтепродукты дробятся, что приводит к увеличению их свободной поверхности и активной адсорбции компонентов СМС. Поэтому для снижения расхода моющих растворов из них необходимо удалять не только твердые загрязнения, но и нефтепродукты.

Основная часть. Наиболее полно требованиям, предъявляемым к технологической очистке моющих растворов, удовлетворяют цилиндрикоконические трехпродуктовые гидроциклоны, которые одновременно способны выполнять очистку жидкостей от нефтепродуктов и твердых частиц. На такую возможность указывал Н.Ф. Тельнов [3], однако очистка моющих растворов от нефтепродуктов в описанном им гидроциклоне [3] неизбежно сопряжена со значительными потерями очищаемой жидкости. Это обусловлено тем, что сливные трубки расположены близко друг к другу и при выводе компонентов раствора происходит их перемешивание. Кроме того, часть раствора непрерывно вытекает через сливной патрубок. Устранение данного недостатка возможно при использовании гидроциклонов, у которых зоны вывода максимально удалены друг от друга. Нами предложена и запатентована конструкция гидроциклона [4], лишенного этих недостатков. Схема конструкции предлагаемого трехпродуктового гидроциклона представлена на рисунке 1.

Он работает следующим образом. При подаче в гидроциклон загрязненного моющего раствора, являющегося проводником электрического тока, зазор между электрическим контактом 1 и крышкой 2 замыкается и электромагнитный клапан вывода нефтепродуктов 3 закрывается, а клапаны вывода очищенной жидкости и шлама 4 и 5 открываются. Выделяемые в процессе очистки нефтепродукты скапливаются под крышкой 2 и, являясь диэлектриком, разрывают электрическую цепь, вызывая тем самым открытие электромагнитного клапана вывода нефтепродуктов 3. При этом электромагнитные клапаны 4, 5 закрываются, что приводит к увеличению давления внутри гидроциклона. При повышении давления скопившиеся масла вытесняются через открытый электромагнитный клапан вывода нефтепродуктов 3. При полном выводе нефтепродуктов электрическая цепь снова замыкается, электромагнитный клапан вывода масел 3 закрывается, а электромагнитные клапаны 4, 5 открываются.

Система управления работой электромагнитных клапанов, установленных на трубках вывода фракций моющего раствора из гидроциклона, нами также запатентована [5].

В результате анализа предложенной модели движения потоков жидкости получены теоретические зависимости, позволяющие определять конструктивные параметры предложенного гидроциклона. Схема конструктивных параметров управляемого трехпродуктового гидроциклона представлена на рисунке 2.



Минимальный внутренний диаметр шламовой насадки $d_{ул}$ (рис. 3) для управляемого гидроциклона определяется по следующей формуле:

$$d_{ул} \geq \sqrt{(0,0625...0,0900)D_u^2 + (d_{сл} + 2\delta_{сл})^2}, \quad (1)$$

где D_u – внутренний диаметр цилиндрической части гидроциклона, м; $d_{сл}$ – внутренний диаметр трубки слива очищенного моющего раствора, м; $\delta_{сл}$ – толщина стенки трубки слива очищенного моющего раствора, м.

Высота крышки гидроциклона

$$H_{кр} = (D_u / 2) / \operatorname{tg}(\alpha_{кр} / 2). \quad (2)$$

Здесь $\alpha_{кр}$ – угол при вершине крышки гидроциклона, град.

Важнейший элемент управляемого гидроциклона – трубка слива очищенного раствора, главными параметрами которой являются ее диаметр $d_{сл}$ и высота $l_{сл}$ части трубки, находящейся внутри гидроциклона. Внутренний диаметр трубки слива очищенного раствора определяется по следующей зависимости:

$$d_{сл} = 1,59 \cdot \chi \cdot \sqrt{(Q - Q_{ул}) / \sqrt{g \cdot h_{ж} + p_2 / \rho_{м.р}}}, \quad (3)$$

где χ – коэффициент, учитывающий вращение жидкости в трубке слива очищенного моющего раствора; Q – производительность гидроциклона, м³/с; $Q_{ул}$ – расход через шламовую насадку, м³/с; $h_{ж}$ – высота столба жидкости над верхним краем трубки слива очищенного моющего раствора, м; p_2 – избыточное давление под крышкой гидроциклона, Па; $\rho_{м.р}$ – плотность моющего раствора, кг/м³.

Для определения высоты сливной трубки, находящейся внутри гидроциклона, необходимо определить расстояние, на котором происходит разворот внешнего нисходящего потока. Взаимосвязь высоты $l_{сл}$ и расстояния l объясняется тем, что в случае расположения верхнего края сливной трубки ниже данного расстояния вся очищаемая жидкость будет уходить из гидроциклона вместе с нефтепродуктами.

В результате анализа модели движения жидкости была получена зависимость, позволяющая определить расстояние от основания конической части, на котором происходит разворот внешнего нисходящего потока:

$$l = \left[\frac{D_u}{2} - \frac{d_{сл}}{2} - 0,88 \frac{d_{мин}}{\psi} (1 / \sqrt{\cos(\alpha_k / 2)} + 0,9) \right] / \operatorname{tg} \frac{\alpha_k}{2}, \quad (4)$$

где $d_{мин}$ – внутренний диаметр питающего патрубка гидроциклона, мм; ψ – коэффициент падения скорости в конической части гидроциклона по сравнению с цилиндрической; α_k – угол конусности конической части гидроциклона, град.

Тогда расстояние, выше которого должна быть установлена трубка слива очищенного раствора, можно определить как

$$l_{cl} = H_k + H_{шл} - l, \quad (5)$$

где H_k – высота конической части гидроциклона, м; $H_{шл}$ – высота шламовой насадки гидроциклона, м.

Для экспериментального определения рациональных конструктивных параметров гидроциклона, его производительности и потерь очищаемой жидкости нами была создана лабораторная установка [6].

В результате проведения исследований были получены следующие уравнения, описывающие производительность гидроциклона, расходы через трубку слива очищенного раствора и шламовую насадку, давление под крышкой в зависимости от режимных и конструктивных параметров:

$$Q_{cl} = -0,493 - 9,650p + 0,372d_{num} - 0,011l_{cl} + 2,375p \cdot d_{num} + 49,375p^2 - 0,013d_{num}^2 + 3,32 \cdot 10^{-5} \cdot l_{cl}^2; \quad (6)$$

$$Q_{шл} = -0,179 + 4,480p - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot d_{num} + 4,6 \cdot 10^{-4} \cdot l_{cl} + 0,288p \cdot d_{num} - 0,033p \cdot l_{cl} + 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot d_{num} \cdot l_{cl} + 15,625p^2; \quad (7)$$

$$Q = -0,572 - 4,080p + 0,366d_{num} - 0,012l_{cl} + 2,663p \cdot d_{num} - 0,040p \cdot l_{cl} + 3 \cdot 10^{-4} \cdot d_{num} \cdot l_{cl} + 64,375p^2 - 0,014d_{num}^2 + 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot l_{cl}^2; \quad (8)$$

$$p_2 = -13,224 - 318,120p + 0,663d_{num} + 0,098l_{cl} + 76,975p \cdot d_{num} + 0,232p \cdot l_{cl} - 738,750p^2 - 2,98 \cdot 10^{-4} \cdot l_{cl}^2. \quad (9)$$

Здесь Q_{cl} – расход моющего раствора через трубку слива очищенного моющего раствора, м³/ч; p – давление жидкости на входе в гидроциклон, МПа.

Анализ потерь очищаемой жидкости, уходящей из гидроциклона вместе с выделенными твердыми загрязнениями, выполнялся по коэффициенту потерь k , который определялся как отношение расхода через шламовую насадку к общей производительности гидроциклона.

По результатам экспериментов были построены зависимости, отображающие взаимосвязь коэффициента потерь моющего раствора (рис. 3, а) и давления под крышкой гидроциклона (рис. 3, б) от его производительности.

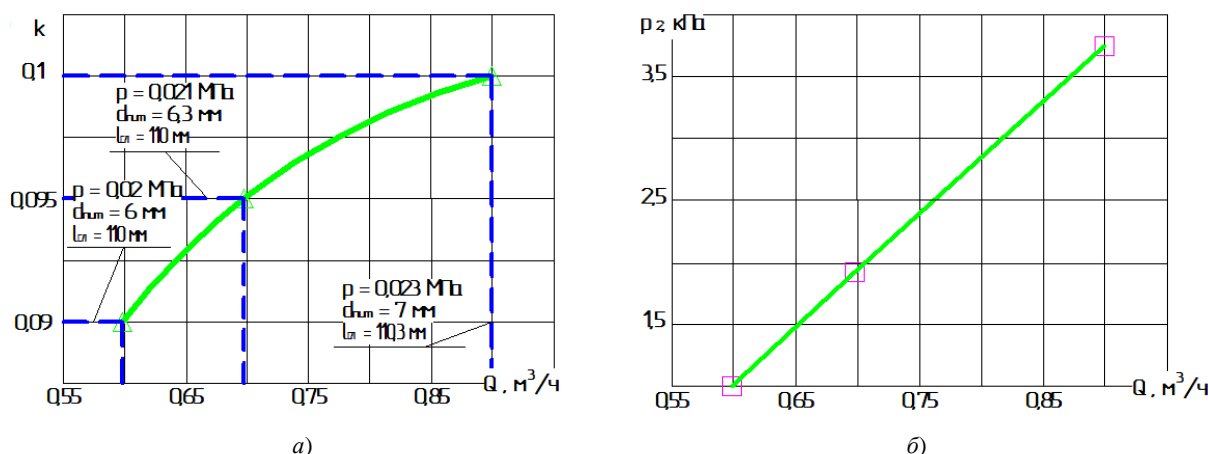


Рис. 3. Зависимости изменения коэффициента потерь моющего раствора и давления под крышкой гидроциклона от его производительности

Установлено, что для исследуемого гидроциклона минимальные значения коэффициента потерь обеспечиваются при давлении на входе в гидроциклон, равном 20 кПа, диаметре питающего патрубка – 6 мм, длине трубки слива очищенного моющего раствора, находящейся внутри гидроциклона, – 110 мм. При этих параметрах производительность гидроциклона составит 0,59 м³/ч, коэффициент потерь будет равен 0,09, а давление под крышкой гидроциклона составит 1,0 кПа.

С растворами Лабомид-203, «Техникс» М-20 и КМ-1 были проведены исследования по определению их электрического сопротивления в зависимости от концентрации СМС, площади контактов и зазора между ними [7]. Исследования показали, что рациональными являются электрические контакты размером 10×10 мм. При этом величина зазора между ними должна быть равна 4 мм.

Кроме того, при разных температурах проводились исследования по определению электрического сопротивления моющего раствора в зависимости от концентрации масла в нем. Аналитические зависимости для определения электрического сопротивления моющего раствора от концентрации масла в нем и температуры очищаемой жидкости приведены в таблице.

Уравнения изменения электрического сопротивления моющего раствора от концентрации содержащихся в нем нефтепродуктов при различных температурах

Температура раствора, °С	Концентрация нефтепродуктов, %			
	0...65		65...80	
	Уравнение	R^2	Уравнение	R^2
20	$R = 123,8 \exp(0,039 C_n)$	0,998	$R = 1,1 \cdot 10^{-7} \exp(0,34 C_n)$	0,99
40	$R = 34,6 \exp(0,049 C_n)$	0,95	$R = -4125,5 C_n^2 + 627939,7 C_n - 2,3 \cdot 10^7$	0,99
60	$R = 18,5 \exp(0,085 C_n)$	0,97	$R = -3864,2 C_n^2 + 593023,7 C_n - 2,2 \cdot 10^7$	1,0

Исследования показали, что с увеличением концентрации масел в моющем растворе существенно повышается электрическое сопротивление последнего, особенно интенсивно оно увеличивается при доведении содержания масел в растворе до 60 %.

Для определения степени очистки моющего раствора управляемым трехпродуктовым гидроциклоном были проведены производственные испытания в ОАО «Витебский мотороремонтный завод».

Исследуемый гидроциклон подключался к изготовленной на заводе моечной машине погружного типа с качающейся платформой. Объем раствора в баке – 3 м³. Моечная машина была установлена на участке разборки двигателей. Для оценки степени очистки раствора трехпродуктовым гидроциклоном отбирались пробы из патрубка вывода очищенной жидкости и выделенных нефтепродуктов.

В результате анализа проб выявлено, что после очистки моющего раствора в трехпродуктовом гидроциклоне концентрация нефтепродуктов снизилась с 21,3 до 4,5 г/л, или на 78,9 %, а твердых загрязнений – с 1,58 до 0,81 г/л, или на 48,6 % [8].

Экономические расчеты показали, что при использовании гидроциклона на одной моечной машине при годовой ремонтной программе 1812 двигателей предприятие за год снизит расход моющих средств на 459 кг и воды на 83,5 м³. Кроме того, применение трехпродуктового гидроциклона для очистки моющих растворов повысит экологическую безопасность предприятия за счет снижения объемов сточных вод.

Заключение. В результате исследований теоретически и экспериментально определены рациональные параметры и режимы работы управляемого трехпродуктового гидроциклона предложенной конструкции, обоснована возможность управления выводом загрязнений из гидроциклона посредством регистрации электрического сопротивления жидкости в зоне накопления нефтепродуктов, установлены закономерности изменения сопротивления моющего раствора в зависимости от концентрации нефтепродуктов и температуры.

Исследования по очистке моющего раствора в ОАО «Витебский мотороремонтный завод» на участке разборки двигателей показали, что при использовании разработанного управляемого трехпродуктового гидроциклона концентрация нефтепродуктов в очищенном растворе снизилась на 78,9 %, а концентрация твердых загрязнений – на 48,6 %. При использовании гидроциклона на одной моечной машине при годовой ремонтной программе 1812 двигателей предприятие за год снизит расход моющих средств на 459 кг и воды на 83,5 м³.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тельнов, А.Ф. Исследование процесса очистки щелочных моющих растворов, применяемых на сельскохозяйственных ремонтных предприятиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / А.Ф. Тельнов. – М.: ГОСНИТИ, 1972. – 148 л.

2. Казаков, А.Л. Интенсификация гидроциклонной очистки моющих растворов электромагнитной обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / А.Л. Казаков. – Горки: БГСХА, 2012. – 162 л.
3. Тельнов, Н.Ф. Технология очистки сельскохозяйственной техники / Н.Ф. Тельнов. – М.: Колос, 1973. – 296 с.
4. Трехпродуктовый гидроциклон: пат. 5479 Респ. Беларусь, МПК В 04С 5/00 / Е.И. Мажугин, А.В. Пашкевич, А.Л. Казаков, М.В. Левкин; заявитель Бел. гос. с.-х. акад. – № u20080838; заявл. 11.11.2008; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 187.
5. Система управления трехпродуктовым гидроциклоном: пат. 8105 Респ. Беларусь, МПК В 04С 5/00 / Е.И. Мажугин, А.В. Пашкевич, Ю.Н. Бушуев; заявитель Бел. гос. с.-х. акад. – № u 20110561; заявл. 11.07.2011; опубл. 03.01.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 212.
6. Мажугин, Е.И. Определение рациональных режимов работы трехпродуктового гидроциклона / Е.И. Мажугин, А.В. Пашкевич // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2011. – № 4. – С. 139–143.
7. Мажугин, Е.И. Экспериментальное определение параметров электрического датчика для автоматизации управления выведением масел из трехпродуктового гидроциклона / Е.И. Мажугин, А.В. Пашкевич // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. тематич. сб. – 2009. – Вып. 43, Т. 2. – С. 133–139.
8. Мажугин, Е.И. Результаты очистки моющего раствора трехпродуктовым гидроциклоном в производственных условиях / Е.И. Мажугин, А.В. Пашкевич // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2012. – № 3. – С. 139–143.

Поступила 31.12.2014

CLEANING SOLUTION TREATMENT MANAGED THREE-PRODUCT HYDROCYCLONE

E. MAZHUGIN, A. PASHKEVICH

Reasonable parameters and performance modes of controlled three-product hydrocyclone of the proposed construction arrangement have been determined theoretically and by experiment. Capability of the controlled ejecting of impurities from hydrocyclone by means of recording liquid electric resistance in the zone of petroleum product accumulation have also been validated theoretically and by experiment. Regularities of cleaning solution resistance variations depending on petroleum product concentration and temperature. Financial viability of using three-product hydrocyclone for cleaning solution treatment at the repair base have been estimated.

УДК 629:004.891

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ И ВИБРАЦИИ КОРПУСА

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; Г.А. УВАРОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается системная проблема диагностирования двигателей автомобилей по виброакустическим колебаниям. Представлены некоторые новые подходы к совершенствованию виброакустического способа диагностирования при помощи современных компьютерных средств. Предлагается повысить достоверность диагностирования исходя из полученных и проанализированных данных о динамических характеристиках отработавших газов и параметрах вибрации двигателя. Проведенное исследование показало, что использование информации о флуктуации динамических параметров позволило уменьшить трудозатраты на диагностирование.

Введение. Мощность и экономичность автомобильного бензинового двигателя обусловлена техническим состоянием его систем управления, питания, зажигания, выпуска и снижения токсичности отработавших газов и газораспределительного механизма. Усложнение современных двигателей и повышение требований к охране окружающей среды связаны с совершенствованием известных и разработкой новых способов диагностирования. Падение цилиндровой мощности в одном или нескольких цилиндрах двигателя приводит к повышению расхода топлива, снижению ресурса, увеличению динамических нагрузок на трансмиссию и повышению токсичности отработавших газов [1]. Эти отклонения не всегда заметны для органолептического восприятия и часто не фиксируются системой самодиагностирования двигателя, что оставляет нераспознаваемой значительную часть неисправностей. Параметры процессов сгорания топливовоздушной смеси (ТВС) в отдельных цилиндрах бензиновых двигателей могут отклоняться от номинальных значений по ряду причин. Выборочное диагностирование сопряжено с проверкой множества элементов различных систем и является трудоемким процессом [2].

Анализ динамических параметров отработавших газов и колебаний корпусной детали двигателя относительно кузова автомобиля позволяет получить диагностическую информацию о характеристиках процессов сгорания и газообмена в цилиндрах двигателя, что способствует более быстрому и достоверному определению неисправностей. Подобная информация используется на практике не в полной мере по причине отсутствия соответствующих способов и приборов. Повышение эффективности такого диагностирования представляет практический интерес.

Цель данной работы – уменьшение трудоемкости и повышение достоверности диагностирования автомобильных бензиновых двигателей путем разработки диагностической системы, состоящей из прибора, способа получения и анализа информации о динамических характеристиках отработавших газов и колебаниях двигателя.

Методы исследования. Для получения и анализа диагностической информации нами использовалась система программно-аппаратных средств, состоящая из персонального компьютера, двухканального аналого-цифрового преобразователя, датчиков перемещений индукционного типа оригинальной конструкции, датчика колебаний высокого напряжения системы зажигания, токовых клещей (рис. 1).

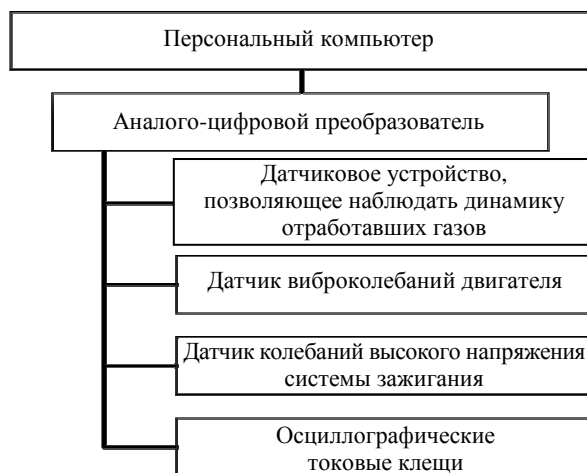


Рис. 1. Состав программно-аппаратного диагностического комплекса

При изучении колебаний среды (отработавших газов) и стенок корпусной детали использовали датчики, каждый из которых состоял из постоянного магнита и индуктивной катушки. Магниты закрепляли на подвижной, а катушку индуктивности посредством штатива – на неподвижной поверхности. Колебания магнита возбуждают в катушке электродвижущую силу, пропорциональную скорости изменения их взаимоположения. В отличие от широко используемых для измерения параметров колебаний датчиков вихретоковых, на основе пьезоэлементов, а также тензометрических примененный нами датчик отличается меньшей стоимостью и простотой. Изменения импульса газов и скорости перемещений стенок корпусной детали двигателя непосредственно преобразуются в выходное напряжение.

Устройство, позволяющее наблюдать изменение динамических параметров отработавших газов на выходе из системы выпуска, состоит из подпружиненного экрана, установленного перпендикулярно потоку исходящих газов, с присоединенным к нему датчиком перемещения индукционного типа. Скорость и направление перемещения экрана зависят от скорости изменения количества движения (импульса) отработавших газов (ОГ). Таким образом, электрическое напряжение, генерируемое датчиком, находится в функциональной зависимости от скорости изменения давления ОГ в системе выпуска, что в свою очередь зависит от давления в камере сгорания в момент начала открытия выпускных клапанов, полноты сгорания ТВС в цилиндре, а также от газодинамического сопротивления системы выпуска. Максимум электрического напряжения, генерируемого датчиком, соответствует максимуму ускорения ОГ. Отсутствие напряжения на выходе датчика соответствует постоянной скорости ОГ. Подвижность экрана (и, таким образом, механическая чувствительность датчика) определяется жесткостью пружины. Сигнал с датчика подается на монитор осциллографа.

Пики колебаний на сигналограмме соответствуют максимуму скорости колебаний корпуса двигателя. Так как нами рассматривались только относительные характеристики (форма и симметричность колебаний), точная калибровка датчиков не требовалась.

Для исследований был выбран бензиновый двигатель автомобиля NISSAN PRIMERA 2001 года выпуска без наддува QGA18DE рабочим объемом 1,8 л и мощностью 84 кВт.

Основная часть. Характер колебаний скорости отработавших газов на выходе из системы выпуска зависит от стехиометрического состава и дисперсности топлива в ТВС, устойчивости искрообразования и компрессии в цилиндрах [4]. В зависимости от вида неисправностей возможны следующие явления:

- топливовоздушная стехиометрическая смесь образуется и подается в цилиндр, но не воспламеняется (циклически или стохастически) в нем, затем воспламеняется в выпускном тракте, порождая волны повышенного давления;
- состав смеси отличается от стехиометрического, что приводит к флуктуации процессов сгорания, импульс ОГ изменяется при этом в широких пределах;
- смесь (циклически или стохастически) не воспламеняется в различных цилиндрах при определенной частоте вращения коленчатого вала или интенсивность пропусков воспламенения возрастает с увеличением этой частоты;
- смесь стохастически не воспламеняется в различных цилиндрах, интенсивность пропусков воспламенения монотонно возрастает, что приводит к остановке двигателя по истечении времени от нескольких секунд до нескольких десятков секунд;
- эффективность сгорания ТВС снижается или монотонно возрастает во времени без изменения режима работы, или изменяется с изменением режима работы;
- флуктуация параметров сгорания ТВС снижается или возрастает по мере прогрева двигателя.

Идентификация данных явлений позволяет с большей вероятностью определять неисправности, связанные с нарушениями в работе систем питания топливом и воздухом, выпуска и нейтрализации отработавших газов, зажигания, механизма газораспределения и системы управления двигателем.

На рисунке 2 представлена сигналограмма колебаний экрана, взаимодействующего с отработавшими газами, при исправном двигателе.

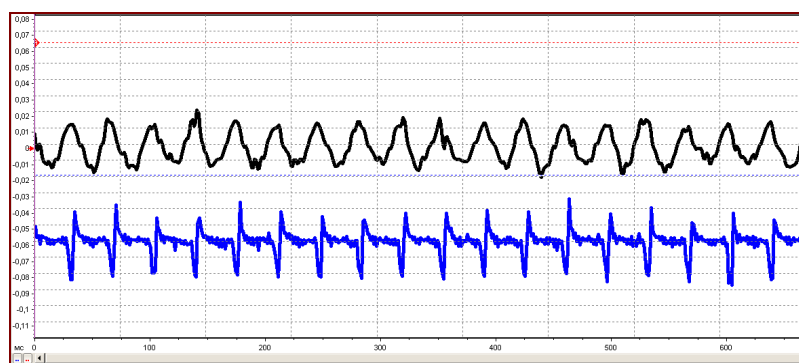


Рис. 2. Сигналограмма исправного двигателя

Сигналограмма датчика динамических параметров выхлопных газов совмещена с осциллограммой сигнала датчика, регистрирующего изменение высокого напряжения системы зажигания. На этом рисунке наблюдаются ряды симметричных колебаний от датчика колебаний высокого напряжения и датчика колебаний экрана.

На рисунке 3 приведена сигналограмма того же двигателя при пропусках воспламенения в одном цилиндре. Отчетливо видно различие значения максимального ускорения ОГ при выпуске из различных цилиндров. Не полностью сгоревшее в одном цилиндре топливо, догорая в системе выпуска, придает ОГ дополнительный импульс. При этом наблюдается устойчивое искрообразование, свидетельствующее об исправности системы зажигания. Данная сигналограмма свидетельствует о неполном сгорании ТВС в одном из цилиндров двигателя. Наиболее возможными причинами этого могут быть механическая неисправность распылителя топливного инжектора данного цилиндра или падение компрессии в цилиндре.

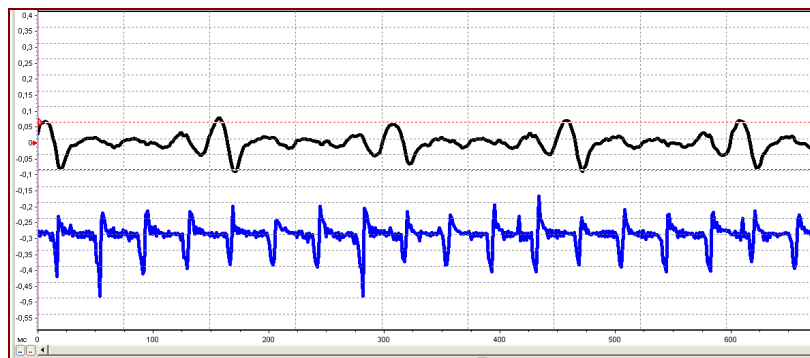


Рис. 3. Сигналограмма неисправного двигателя

Устройство, позволяющее наблюдать динамику отработавших газов, имеет регулятор натяжения пружины экрана, что позволяет управлять чувствительностью диагностического устройства. Чем меньше сжата пружина, тем более подвижен экран. И наоборот, сжатие пружины регулировкой приводит к игнорированию слабых воздействий, позволяя выделять информативный сигнал (рис. 4 и 5).



Рис. 4. Чувствительность датчика понижена

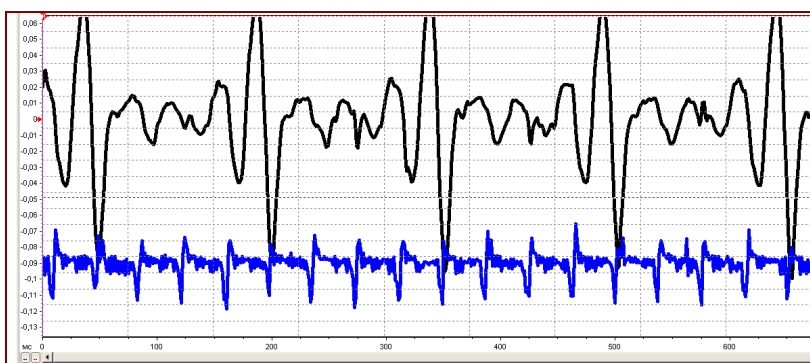


Рис. 5. Чувствительность датчика повышена

Дополнительную диагностическую информацию можно получить, изучая параметры колебаний двигателя. Частота и амплитуда колебаний двигателя относительно кузова автомобиля зависят от частоты вращения коленчатого вала, нагрузки на двигатель и цилиндровой мощности. При исправных элементах демфирующей подвески двигатель совершает колебания относительно кузова с частотой, равной удвоенной частоте вращения коленчатого вала. В первой трети такта рабочего хода давление в цилиндре достигает максимума, а во второй трети рабочего хода двигатель отклоняется в сторону, противоположную направлению вращения коленчатого вала. В последней трети такта рабочего хода давление в цилиндре уменьшается, при этом упругая подвеска отклоняет двигатель в обратную сторону. Таким образом, за один поворот коленчатого вала происходит два циклических колебания от одного цилиндра.

При равной цилиндровой мощности амплитуды колебаний должны быть равны, а их сигналограммы симметричны, т.е. высоты пиков, а также продолжительность одного колебания должны быть одинаковы. При неисправностях систем питания или зажигания, выпуска и нейтрализации отработавших газов или газораспределительного механизма характер колебаний изменяется.

На рисунке 6 представлена сигналограмма колебаний корпусной детали исправного двигателя, где отчетливо наблюдается примерно равная максимальная скорость колебаний, ветви колебаний одинаковы.

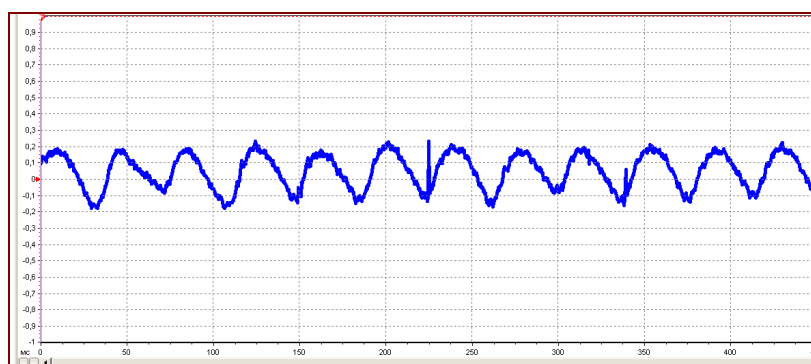


Рис. 6. Сигналограмма колебаний двигателя при минимальной разнице цилиндровой мощности

На рисунке 7 отображена сигналограмма колебаний двигателя при падении мощности одного из цилиндров. На осциллограмме отчетливо видно циклическое (в течение четырех тактов) асимметричное изменение скорости колебаний, вызванное различием цилиндровой мощности. В данном случае уменьшение мощности одного из цилиндров не было заметно для органолептического восприятия и не было зарегистрировано системой самодиагностирования.

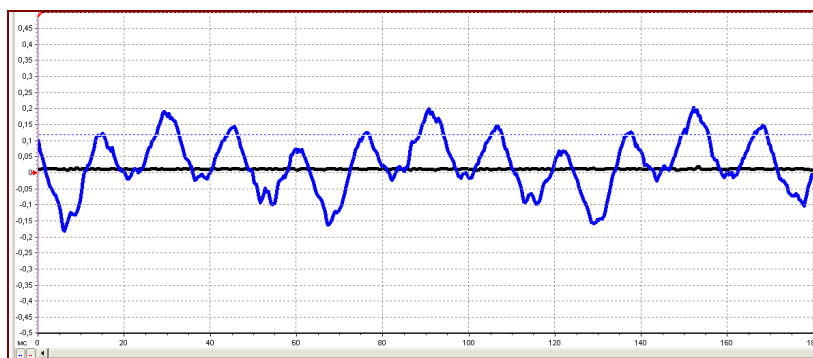


Рис. 7. Сигналограмма колебаний двигателя при падении мощности одного из цилиндров

Предложенный способ позволяет отнести диагноз к отдельному цилиндру, выявить неисправность системы зажигания, падение компрессии, предположить о неисправности инжектора без выполнения разборочных операций. Например, при случайном падении мощности в различных цилиндрах и усилении флуктуации процессов сгорания при увеличении частоты вращения коленчатого вала можно предполагать о снижении давления топлива по причине неисправности топливного насоса или регулятора дав-

ления. Следующим целесообразным диагностическим шагом будет проверка давления топлива в рампе. При быстром равномерном монотонном снижении импульса ОГ сразу после пуска двигателя можно предполагать о повышенном сопротивлении отработавшим газам в системе выпуска из-за оплавления катализатора нейтрализации ОГ. Целесообразно будет проверить работу двигателя с отсоединенным катализатором или снятым первым датчиком кислорода.

При исправной системе зажигания, диагностируемой по динамике электромагнитного поля, генерируемого цепями высокого напряжения, следующим целесообразным диагностическим шагом будет проверка относительной компрессии в цилиндрах по силе тока, потребляемого стартером. Динамику потребления тока стартером целесообразно изучать с использованием осциллографа и токовых клещей.

Заключение. Анализ динамики отработавших газов и колебаний двигателя позволяет получить информацию о характере сгорания топлива и обосновать предположения о возможных неисправностях. Выполненные эксперименты подтвердили применимость способа для выявления пропусков воспламенения, снижения эффективности сгорания топлива в цилиндрах.

Предложенное программно-аппаратное средство обеспечивает сравнительно низкую трудоемкость диагностирования, позволяет локализовать и идентифицировать неисправности, связанные с системами питания, зажигания и выпуска отработавших газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрулев, А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей / А.Э. Хрулев. – М.: За рулем, 1999. – 438 с.
2. Данов, Б.А. Электронные системы управления иностранных автомобилей / Б.А. Данов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 224 с.
3. Яманин, А.А. Динамика поршневых двигателей: учеб. пособие / А.А. Яманин, А.В. Жаров. – М.: Машиностроение, 2003. – 464 с.
4. Железко, Б.Е. Основы теории и динамика автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие для вузов / Б.Е. Железко. – Минск: Выш. шк., 2005. – 304 с.

Поступила 24.11.2014

DIAGNOSING OF THE AUTOMOBILE PETROL ENGINES ON DYNAMIC PARAMETERS THE FULFILLED GASES AND CASE VIBRATION

V. IVANOV, H. UVAROV

In article the system engineering problem diagnostics of engines of cars is considered. Some new approaches to perfection vibroacoustic a method of diagnosing by use of modern computer means are presented. It is offered to raise reliability of process of diagnosing by reception and the analysis of the data about dynamic characteristics of the let out fulfilled gases and vibration parameter of the engines. Use of the information on characteristics of fluctuation dynamic parameters, allows to lower labor input of diagnosing.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.693

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

*канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК;
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН; канд. техн. наук Т.В. ВИГЕРИНА
(Полоцкий государственный университет)*

Представлены теоретические исследования, в ходе которых получены зависимости величины осевой деформации элементов восстанавливаемой детали от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материала восстанавливаемого изделия и материала, используемого для их восстановления. Полученные зависимости позволяют прогнозировать растягивающие напряжения в наносимом материале, также появляется возможность определить укорочение вала в случае его восстановления наплавкой и величину ширины трещины, которую в состоянии стянуть сварной шов, наносимый выбранным материалом. Предложенный способ заварки трещин поперечными швами имеет явные преимущества перед другими способами: исключает подогрев заготовки, разделку, засверливание концов трещин и последующую механическую обработку швов; обеспечивает наибольшую герметичность; стягивает трещину за счет повышенной продольной усадки сварных швов; придает стойкость против образования холодных и горячих трещин.

Введение. Восстановление прочности изнашиваемых элементов деталей за счет восстановления размеров поперечных сечений производится автоматически при нанесении покрытий.

Основные работы по восстановлению прочности включают устранение пробоин и трещин. Устранение пробоин – установка стальных накладок с закреплением их полимерными композициями или сваркой. Основные способы устранения трещин: нанесение на поверхность детали полимерного покрытия; стягивание фигурными вставками; сварка. Полимерные покрытия на основе эпоксидной смолы применяют для устранения трещин любых размеров. Однако под действием вибраций и тепла с конденсацией воды такие покрытия недолговечны. Вода попадает под края покрытия, которое постепенно отслаивается, а стенки изделия подвергаются глубокой коррозии. Стяжки (фигурные вставки) не позволяют устранять раскрытые трещины с зазором более 0,3 мм и не обеспечивают герметичность стыка. Основной объем работ по восстановлению как статической прочности корпусных деталей, так и герметичности их стенок приходится на сварку.

Нами предложен процесс сварки трещин стальными электродами ЦЧ-4 из проволоки Св-08 или Св-08А диаметром 3...4 мм с толстым фтористо-кальциевым покрытием. Покрытие включает титан или ванадий, содержание которых в наплавленном металле доходит до 9,5 %. Сварку ведут на постоянном токе силой 120...150 А обратной полярности при напряжении 20 В. Перед сваркой рекомендуется трещину разделить на глубину 2/3, заготовку подогреть до температуры 150...200 °С, а после наплавки валиков их сразу же проковать. Поскольку герметичность стенок восстанавливалась не всегда, сварной шов паяли припоями ПОС-30 или ПОС-40.

Лучшие результаты дает применение самозащитной проволоки ПАНЧ-11 диаметром 1,2 мм состава (% масс.): никель 80, медь 2...3, марганец 1...4, редкоземельные элементы 0,1...0,5, железо – остальное (ТУ 48-2-593-77). Стенки детали зачищают до блеска и разделяют на глубину 3...5 мм, вылет электрода составляет 10...20 мм. Используют полуавтомат ПДГ-305У3. Сварку вели прерывистыми валиками длиной 30...50 мм. После каждого перехода валику давали остыть до температуры 40 °С и обрабатывали металлической щеткой. Однако наблюдались холодные трещины вдоль шва в зоне термического влияния.

При ступенчатом снижении напряжения до 22, 29 и 18 В число сварочных трещин резко снижалось. При достижении напряжения до 14...16 В трещины не возникали, однако глубина проплавления увеличивалась и составляла 2 мм. Дальнейшее понижение напряжения дуги было недопустимым. Изменение полярности с прямой на обратную повысило выделение тепла на электроде, снизило нагрев заготовки и обеспечило герметичность шва. Это подтверждено и экспериментальными исследованиями ГосНИТИ при сварке конструкций машин сельскохозяйственного назначения.

В последние годы на примере восстановления нижних перемычек между цилиндрами на ряде заводов апробирована сварка трещин поперечными валиками проволокой ПАНЧ-11. Усталостная проч-

ность перемычек стала выше, чем у новых. Практика подтверждает возможность устранения других трещин. Нецелесообразно устранять трещины крышек коренных подшипников.

Предложен следующий процесс устранения трещин на стенках водяной рубашки чугунных блоков цилиндров. Трещину кернят по ее линии через 15...20 мм, поскольку после зачистке она становится невидимой. Зачищают поверхность вокруг трещины до металлического блеска и снова кернят, чтобы линия была видна при сварке. Вместо кернения края трещины можно заглубить на 1,0...1,5 мм в тело детали. Трещину не разделяют, а ее концы не засверливают.

Для смыкания раскрытых трещин необходимо свариваемый элемент сжать одной или несколькими накладными струбцинами. Это способствует восстановлению формы отверстий, на которые выходят трещины. При сварке трещины, возникшей в одной средней перемычке блока цилиндров двигателя Д-240, она закрывается практически полностью. При одновременной сварке сквозных трещин в трех перемычках наблюдается их стягивание до 0,17 мм, крайних перемычек до 0,10 мм. Следовательно, при сварке перемычек полного закрытия трещин за счет стягивания их сварным швом не происходит, а значит, герметизация перемычек не восстанавливается. Использование скоб устраняет это явление (до 0,03...0,08 мм).

Сварку ведут швами не вдоль, как обычно, а перпендикулярно трещине швами длиной 15...20 мм с перекрытием на одну треть их ширины. После наложения каждого шва ожидают остывания материала примерно до 40 °С. Концы трещины заваривают на 10...15 мм дальше видимой зоны ее распространения. Если трещина расположена в средней части детали, заваривают начиная со середины, и далее продолжают заварку попеременно в одну и другую сторону. Если трещина расположена у торца детали, ее заварку начинают с того конца, который наиболее удален от торца, затем продолжают попеременно в одну и другую стороны – от середины и от концов. После наложения швов на середине и концах трещины последующие швы равномерно распределяют по всей длине трещины. Укорачивающиеся швы при охлаждении плотно смыкают поверхности трещины.

При заварке длинных трещин используют обратноступенчатый способ. При этом трещину разбивают на участки длиной 100...150 мм. Шов на каждом участке наплавляют в направлении, обратном общему направлению сварки. Резкое уменьшение деформации при обратноступенчатом способе объясняется тем, что из двух соседних участков деформации имеют противоположное направление и вызывают в сварном шве незначительные волнистые искривления. Уменьшению деформаций способствуют равномерный нагрев сварного шва и перерывы в процессе сварки.

Таким образом, основной объем работ по восстановлению статической прочности корпусных деталей, как и герметичности их стенок, приходится на сварку, которая также сопровождается большими тепловложениями и укорочением длины сварного шва [1; 2].

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 предшествуют 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 и неравномерного 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. Длина коленчатых валов после нескольких наплавков 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.

Цель данного исследования – получить зависимости, позволяющие учитывать теплофизические и механические свойства материала восстанавливаемых деталей и материала, используемого при восстановлении, для прогнозирования их поведения и внесения необходимых изменений в процесс восстановления.

Методики и оборудование. В качестве наплавочных материалов использовались проволоки ПП-Нп-80Х20Р3Т, Св-08Х13 с различным содержанием углерода и легирующих элементов. Для наплавки образцов использовали установку, созданную на базе списанного станка модели 16К20. Защитные газы подавали из двух баллонов в смеситель, необходимое процентное соотношение газов регулировали изменением давления на их входе в смеситель.

Результаты и обсуждения. Для расчета деформаций в материале восстанавливаемой детали и валике наплавленного металла и внутренних напряжений 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 детали 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.

С учетом условия, что материал валика в направлении оси детали будет растянут под действием силы $P_{pc} = \pi a d (t_n - t_k) \alpha E_\sigma$, а материал шейки детали под валиком сжат под действием силы

$P_{сж} = \frac{\Delta}{b} \cdot E_\sigma \cdot \frac{\pi (d - a)^2}{4}$ (рис. 1), была составлена система уравнений, решение которой позволило рассчитать осевую деформацию Δ (рис. 2):

$$\Delta = \frac{E_\sigma a b d \alpha (t_n - t_k)}{\left(E_\sigma a d + \frac{E_\sigma (d - a)^2}{4} \right)}, \text{ м}, \quad (1)$$

где E_σ, E_δ – модули упругости первого рода для материала валика и детали, Па; a и b – меньшая и большая оси эллипса сечения наплавляемого валика, м; d – диаметр наплавляемого вала, м; α – температурный коэффициент линейного расширения, 1/К; t_n и t_k – соответственно температура нагрева материала покрытия и комнатная температура, К.

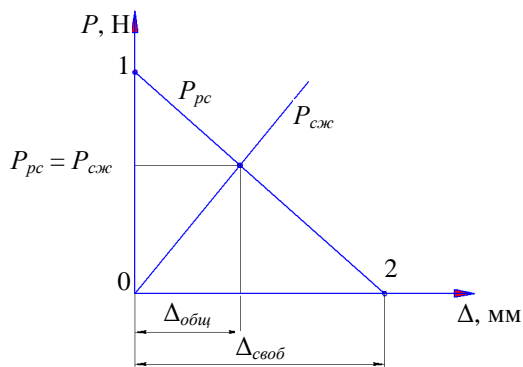


Рис. 1. Графики силы P_{pc} , растягивающей покрытие, и силы $P_{сж}$, сжимающей основной материал детали, в зависимости от деформации Δ

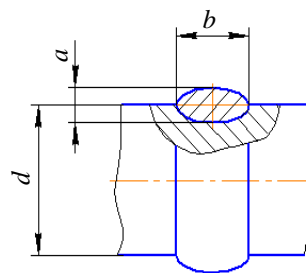


Рис. 2. Схема шейки детали с наплавленным валиком материала

Расчетная осевая деформация при наплавке одного валика покрытия проволокой Св-08Х13, равная 0,01151 мм, меньше аналогичного показателя при наплавке проволокой У7, равного 0,01365 мм. Определяющее влияние на деформацию, а следовательно и на остаточные напряжения, оказывает температура нагрева материала покрытия и температурный коэффициент линейного расширения. Меньшее влияние оказывает соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки [3].

Следовательно, при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением температурного коэффициента линейного расширения, нанесение покрытий вести с минимально возможным нагревом материала, а число наплавочных шеек коленчатых валов ограничить двумя в течение срока их службы.

При восстановлении прочности корпусных деталей для смыкания раскрытых трещин необходимо свариваемый элемент сжать одной или несколькими накладными струбцинами. Это способствует восстановлению формы отверстий, на которые выходят трещины. При сварке трещины, возникшей в одной средней перемычке блока цилиндров двигателя Д-240, она закрывается практически полностью. При одновременной сварке сквозных трещин в трех перемычках наблюдается их стягивание до 0,17 мм, крайних перемычек до 0,10 мм. Следовательно, при сварке перемычек полного закрытия трещин за счет стягивания их сварным швом не происходит, а значит, герметизация перемычек не восстанавливается. Использование скоб устраняет явление (до 0,03...0,08 мм). В силу значительных стягивающих напряжений и невысокой склонности к образованию околошовных трещин наиболее приемлемой с точки зрения герметичности является сварка со швами поперек трещины (рис. 3).

Укорочение сварного шва $\Delta l_{ш}$ при свободном охлаждении, если температура металла изменяется от температуры его плавления до комнатной (точка 2 на графике, рис. 4):

$$\Delta l_{ш} = \alpha l_{ш}(T_{пл} - T_0), \text{ м}, \tag{2}$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения материала сварного шва, 1/К; $l_{ш}$ – длина сварного, м; $T_{пл}$ и T_0 – соответственно температура плавления материала сварного шва и температура комнатная, К.

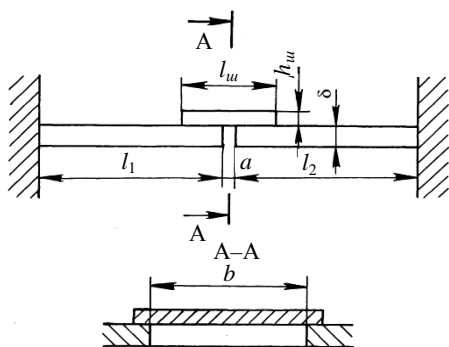


Рис. 3. Схема сварного соединения при устранении трещины

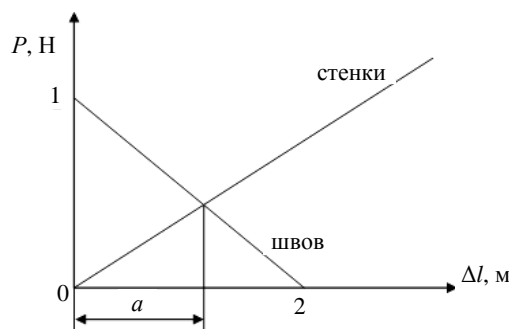


Рис. 4. Графики зависимости усилий P в сварном шве и стенках детали от деформации Δl

Если не позволить сокращение длины сварного шва сопротивлением стенок детали, сила его растяжения P , отнесенная к единице ширины (точка 1 на графике, рис. 4), равна

$$P = \frac{\alpha l_{ш}(T_{пл} - T_0)E_{ш}h_{ш}}{l_{ш}} = \alpha(T_{пл} - T_0)E_{ш}h_{ш}, \text{ Н/м}, \tag{3}$$

где $E_{ш}$ – модуль нормальной упругости материала сварного шва, МПа; $h_{ш}$ – высота сечения сварного шва, м.

Сила (на рисунке 4 график силы проходит через начало координат), отнесенная к единице ширины сварного шва, необходимая для стягивания стенок детали и закрытия трещины шириной Δl , равна

$$P = \frac{E_0 \Delta l \delta}{l_1 + l_2}, \text{ Н/м}, \tag{4}$$

где E_0 – модуль нормальной упругости материала детали, МПа; δ – толщина стенки детали, м; l_1 и l_2 – длина стягиваемых участков стенки, м.

Уравнение прямой (рис. 4), проходящей через точки 1 и 2, имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta l - 0}{l_{ш}\alpha(T_{пл} - T_0) - 0} = \frac{P - \alpha(T_{пл} - T_0)E_{ш}h_{ш}}{0 - \alpha(T_{пл} - T_0)E_{ш}h_{ш}},$$

откуда

$$P = -\frac{\Delta l \cdot E_{ш}h_{ш} - l_{ш}\alpha(T_{пл} - T_0)E_{ш}h_{ш}}{l_{ш}}. \tag{5}$$

Сравнивая уравнения (4) и (5), находим равновесную деформацию Δl :

$$\Delta l = \frac{\alpha(T_m - T_0)E_u h_u l_u (l_1 + l_2)}{E_u h_u (l_1 + l_2) + E_o \delta l_u}. \quad (6)$$

Расчеты показывают, что если края стенки толщиной 10 мм с трещиной защемлены, а длина сварных швов высотой 4 мм равна 20 мм, то эти швы стягивают трещину шириной до 0,04 мм. Для получения надежных результатов необходимо стенки с трещинами перед их сваркой стягивать резьбовыми трубцинами [4].

Таким образом, предложенный способ заварки трещин поперечными швами дает такие преимущества, как исключение подогрева заготовки, разделки, засверливания концов трещин и последующей механической обработки швов, обеспечивает наибольшую герметичность (по сравнению с ранее применяемыми способами) без проковки и нанесения покрытий; стягивает трещину за счет повышенной продольной усадки сварных швов; придает стойкость против образования холодных и горячих трещин; создает условия для разрушения оксидной пленки с поверхности сварочной ванны движущимися положительными ионами; обеспечивает возможность заварки слабых стенок с двух сторон; допускает 2...4-кратную заварку трещин слабых стенок в одном и том же месте (с предварительной зачисткой сварного шва); обеспечивает получение соединений, равнопрочных с материалом заготовки; допускают устранение трещин длиной до 1,5 м, что в 6 раз превышает установленную их длину нормативными документами.

Выводы. Полученные зависимости величины деформации, возникающей при восстановлении деталей типа «вал» и заварке трещин в корпусных деталях, от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материалов детали и покрытия, размеров наносимого валика материала позволяют прогнозировать растягивающие напряжения в наносимом материале. Также появляется возможность определить укорочение вала в случае его восстановления наплавкой и величину ширины трещины, которую в состоянии стянуть сварной шов, наносимый выбранным материалом. Использование полученных зависимостей позволяет вносить необходимые изменения в технологический процесс восстановления деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кастрюк, А.П. Устранение сваркой трещин в корпусных деталях / А.П. Кастрюк // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: тез. науч.-практ. семинара, Минск, 10–13 апр. 2012 г.). – Минск: БНТУ. – 2012. – С. 104–105.
2. Иванов, В.П. Ремонт машин. Технология, оборудование, организация: учебник / В.П. Иванов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2006. – 448 с.
3. Вигерина, Т.В. Влияние наплавки на длину коленчатого вала при восстановлении / Т.В. Вигерина // Вестн. БНТУ. – 2011. – № 6. – С. 14–18.
4. Кастрюк, А.П. Ресурсосбережение и качество ремонта агрегатов машин с восстановлением их деталей: науч. изд. / А.П. Кастрюк, Т.В. Вигерина. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – 199 с.

Поступила 20.01.2015

RESTORATION OF DETAILS OF CARS TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE OF HEATPHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

A. KASTRUK, A. DUDAN, T. VIGERINA

In work theoretical researches during which dependences of size of axial deformation of elements of the restored detail on the module of elasticity, temperatures of heating and temperature coefficient of linear expansion of material of the restored product and the material used for their restoration are received are conducted. The received dependences allow to predict the stretching tension in the applied material. Also there is an opportunity to determine shortening of a shaft in case of its restoration by a overlaying and the size of width of a crack which is able to pull together the welded seam put with the chosen material. The offered way of tea leaves of cracks cross seams gives such advantages as an exception of heating of preparation, cutting, spotting of the ends of cracks and the subsequent machining of seams, provides the greatest tightness, pulls together a crack due to the increased longitudinal shrinkage of welded seams; gives firmness against formation of cold and hot cracks.

УДК 620.172:620.178

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ ХРОМОМОЛИБДЕНОВЫХ СТАЛЕЙ ЗМЕЕВИКОВ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ

канд. техн. наук А.В. КРЫЛЕНКО
(Полоцкий государственный университет)

Исследуется деградация структуры теплоустойчивых хромомолибденовых сталей змеевиков трубчатых печей. Установлен количественный критерий определения степени деградации теплоустойчивых хромомолибденовых сталей по размеру коагулированных карбидов металлов в их структуре. Предложена шкала баллов коагуляции карбидов, позволяющая принимать объективное решение о возможности дальнейшей безопасной эксплуатации конструкций технологического оборудования.

Введение. Нефтеперерабатывающая промышленность играет важную роль в экономике Республики Беларусь. Оборудование заводов этой отрасли перерабатывает взрывопожароопасные и агрессивные высокотоксичные вещества при высоких температуре (до 550 °С) и давлении (до 10 МПа). Работа этого оборудования отличается возрастающей интенсификацией технологических процессов с повышением их основных параметров. Чрезвычайные ситуации, обусловленные разрушением конструкций нефтеперерабатывающего оборудования, приводят к экономическим издержкам, связанным с дорогостоящим ремонтом и неиспользуемой выгодой от реализации продукции, человеческим травмам и жертвам, а также к загрязнению окружающей среды. Наиболее распространенной причиной отказов оборудования является естественное старение материала. Можно предположить, что без принятия необходимых мер количество отказов оборудования будет увеличиваться. Опыт эксплуатации установок нефтеперерабатывающих заводов показывает, что увеличение срока службы оборудования без научного обоснования может привести к аварийным разрушениям.

Старение материалов в процессе эксплуатации проявляется в виде изменения микроструктуры и, как следствие, механических свойств, что приводит к возникновению потенциально опасных зон в материале и исчерпанию ресурса оборудования. Для критериальной оценки ресурса необходимо располагать качественными и количественными показателями структуры и механических свойств материала. Деградиционные изменения материала конструкций технологического оборудования должны быть выявлены на ранней стадии их проявления путем контроля этого материала.

Трубчатые печи являются основным технологическим оборудованием многих установок нефтеперерабатывающих заводов. Все трубчатые печи имеют принципиально одинаковое устройство: внутренний объем печи разделяется на камеру радиации (топочное пространство) и камеру конвекции. В камере радиации установлены топливные форсунки. Условия работы материала змеевиков трубчатых печей, характеризуемые высокой температурой и высоким давлением, а также агрессивностью технологической среды, разнообразны. Так, значения температуры в печных змеевиках составляют 100...550 °С, давления среды – 0,2...6,0 МПа. Работа трубчатых печей характеризуется постоянной циркуляцией по змеевикам значительного количества горючей жидкости, нагреваемой до высокой температуры и находящейся под большим внутренним давлением, а также наличием в топочном пространстве источников открытого огня. Под воздействием высоких температур, давления, агрессивных сред, а также вследствие длительной эксплуатации трубчатых змеевиков в материале активно протекают процессы старения: деградация структуры и изменение механических свойств, которые отрицательно влияют на работоспособность печного оборудования, могут стать причиной его аварийного разрушения. Под деградацией конструкционных сталей в данном случае подразумевается процесс изменения в худшую сторону структуры, а следовательно, и механических свойств под воздействием эксплуатационных факторов.

Целью данного исследования являлось нахождение эффективного структурного критерия оценки безопасной работы змеевиков трубчатых печей, изготовленных из теплоустойчивых хромомолибденовых сталей (15ХМ, 15Х5М, 13Х9М, 10Х12В2МФ, 10Х13М1). Исследования проводились в лабораторных и полевых условиях. Металлографический анализ проводился с использованием инвертированного металлографического микроскопа «ViewMet» и переносного металлографического микроскопа «ТКМ», испытание материала на растяжение осуществлялось на универсальной разрывной машине «УТС 110М-200», испытание материала на ударный изгиб – на маятниковом копре «МК-300».

Основная часть. Деградация микроструктуры теплоустойчивых хромомолибденовых сталей 15ХМ, 15Х5М, 13Х9М, 10Х12В2МФ, 10Х13М1 происходит при их длительной эксплуатации при высокой температуре ($\approx 500...550$ °С) или при кратковременных перегревах (> 600 °С). Она сопровождается снижением прочностных и пластических характеристик материала. Подобные изменения в материале крайне нежелательны и опасны, так как могут привести к разрушению труб змеевиков во время эксплуатации печей [1; 2].

Снижение конструкционной прочности сталей объясняется коагуляцией карбидной фазы типа Mo_2C , Cr_7C_3 , VC , Me_3C , Me_7C_3 и Me_{23}C_6 (Mo – атом молибдена; Cr – атом хрома; V – атом ванадия; Me – атомы молибдена, хрома и ванадия; C – атом углерода) и обеднением молибденом твердого раствора из-за перехода его в карбиды [3]. Работоспособное состояние теплоустойчивых хромомолибденовых сталей зависит не только от количества коагулированных карбидов, но и от их размера. Однако в научной литературе отсутствуют сведения о влиянии размера коагулированных карбидов на состояние хромомолибденовых сталей, поэтому разработка количественного критерия оценки безопасности эксплуатации конструкций из теплоустойчивых сталей, структура которых претерпела деградацию, является актуальной. В качестве такого критерия выбран размер коагулированных карбидов. Для оценки размера коагулированных карбидов, до которого возможна безопасная эксплуатация материала, исследованы печные змеевики из теплоустойчивой хромомолибденовой стали 15X5M после различного срока эксплуатации и степени перегрева. Наличие коагулированных карбидов в структуре стали и их размер выявлялись на образцах, вырезанных из труб змеевиков, а также непосредственно на трубах путем проведения полевой металлографии. Типичные микроструктуры стали 15X5M приведены на рисунке 1.

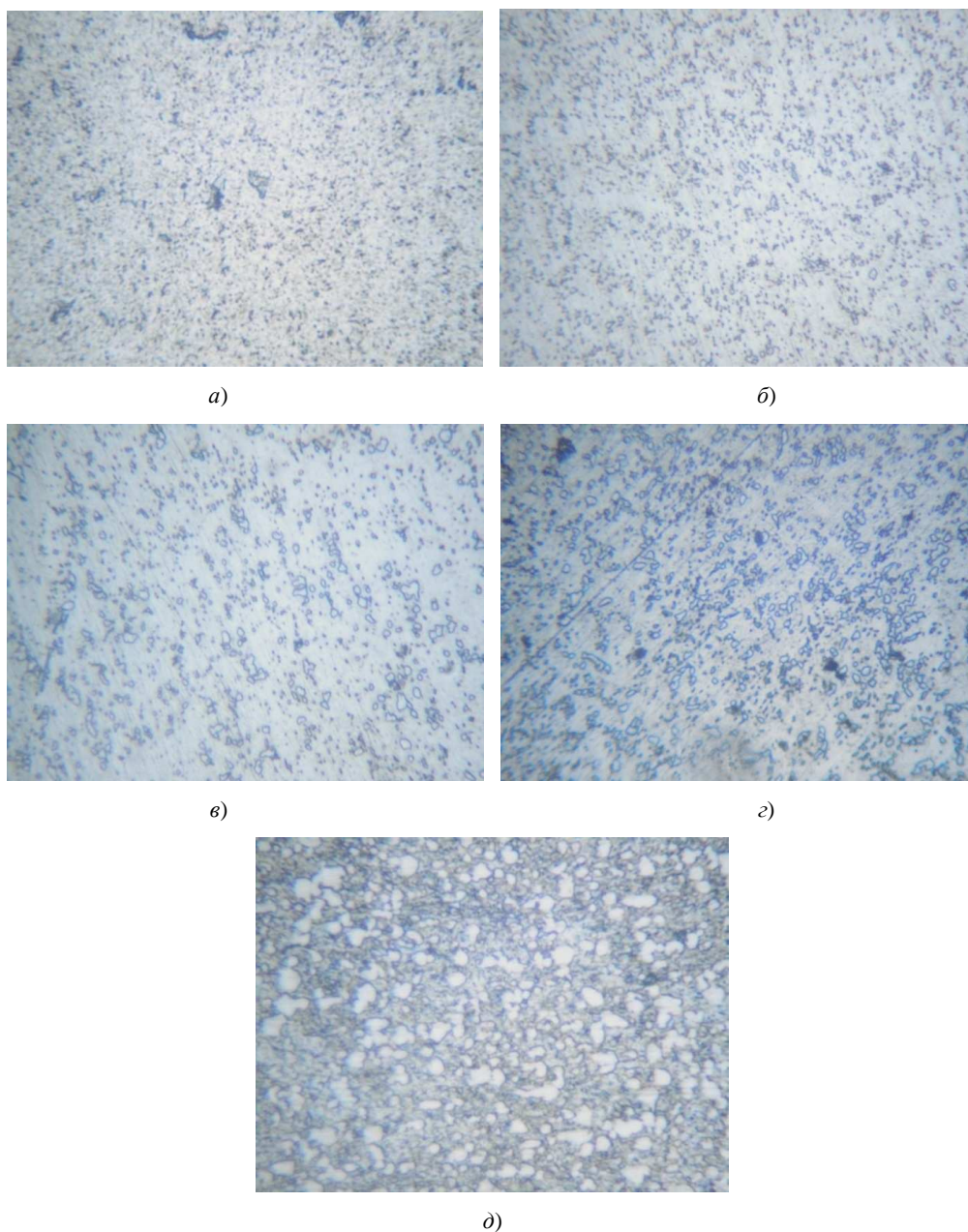


Рис. 1. Примеры типичных микроструктур стали 15X5M с различной степенью коагуляции карбидов ($\times 500$):
а – балл 0; б – балл 1; в – балл 2; г – балл 3; д – балл 4

До эксплуатации сталь 15X5M имеет структуру (рис. 1, а), содержащую феррит и равномерно распределенные в нем структурно свободные зернистые карбиды в виде отдельных включений размером до 1 мкм. Такая структура обеспечивает необходимую теплоустойчивость стали, так как основная масса молибдена находится в феррите, а хром и углерод – в карбидах. Средние значения механических свойств составляют: предел прочности $\sigma_b = 500...540$ МПа; относительное удлинение $\delta_5 = 26...32$ %; относительное сужение $\psi = 58...64$ %; ударная вязкость $KCU = 280...310$ Дж/см².

В течение длительной эксплуатации при высокой температуре сталь 15X5M сохраняет феррито-карбидную структуру, однако в ней происходят структурные изменения, характеризующиеся обеднением твердого раствора α -железа (феррита) молибденом, изменением фазового состава карбидов с коагуляцией карбидных частиц.

На рисунке 1, б показана микроструктура, имеющая начальную стадию деградации. Под воздействием высокой температуры происходит перераспределение молибдена в структуре стали – он выделяется из феррита с образованием карбидов. Размер карбидов составляет 1...2 мкм. Происходит снижение механических свойств: $\sigma_b = 470...495$ МПа; $\delta_5 = 25...27$ %, $\psi = 50-58$ %, $KCU = 220...240$ Дж/см². В дальнейшем происходит коагуляция карбидов, имеет место их скопление преимущественно по границам ферритных зерен. При этом по расположению карбидов можно судить о границах зерен. Размер коагулированных карбидов 2...4 мкм. Микроструктура стали показана на рисунке 1, в. Средние значения механических характеристик: $\sigma_b = 400...420$ МПа; $\delta_5 = 22...24$ %, $\psi = 46...53$ %, $KCU = 170...190$ Дж/см².

При дальнейшей деградации структуры происходит укрупнение карбидных частиц с образованием цепочек карбидов типа «ожерелья» по границам зерен при одновременном укрупнении карбидных частиц по телу зерен (рис. 1, г). Средний размер карбидов составляет 4...8 мкм. При этом наблюдается значительное снижение механических характеристик по сравнению со свойствами материала до эксплуатации: $\sigma_b = 355...370$ МПа; $\delta_5 = 21...22$ %; $\psi = 40...45$ %; $KCU = 90...110$ Дж/см². На завершающей стадии деградации структуры молибден практически полностью переходит из твердого раствора в карбиды. При этом средний размер карбидов составляет 8...14 мкм, они расположены по всему объему материала (рис. 1, д). Как следствие, происходит потеря пластичности и теплоустойчивости материала. При механической обработке заготовки из такого материала хрупко разрушаются (рис. 2).

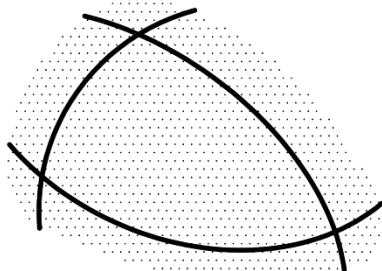
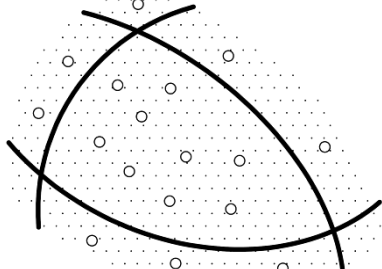
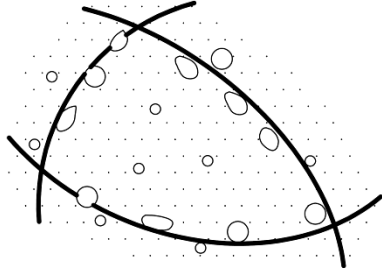
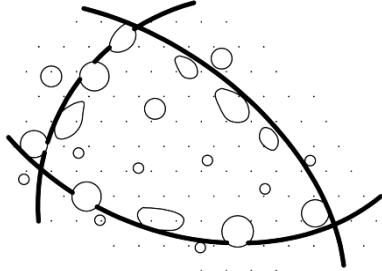
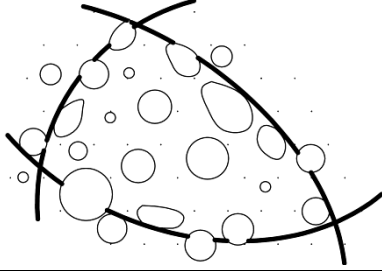


Рис. 2. Хрупкое разрушение образцов из стали 15X5M при механической обработке (излом показан стрелками)

Таким образом, очевидно, что чем больше размер коагулированных карбидов в структуре теплоустойчивой хромомолибденовой стали, тем значительнее снижение ее свойств.

На основании обобщения полученных данных разработана шкала баллов коагуляции карбидов в структуре теплоустойчивых хромомолибденовых сталей, позволяющая анализировать структуру оборудования из хромомолибденовых сталей, в том числе неразрушающей полевой металлографией, и определять фактическое состояние материала. Микроструктуры разделены на баллы по среднему размеру коагулированных карбидов. При помощи данной шкалы можно ориентировочно оценивать степень поврежденности структуры и, как следствие, деградации данных сталей. В таблице приведены баллы микроструктур, соответствующие им размеры коагулированных карбидов, схемы структурных изменений и средние значения механических свойств материала.

Характеристика баллов микроструктур теплоустойчивых хромомолибденовых сталей после длительной эксплуатации (см. рис. 1)

Балл микро- структуры	Вид структуры	Характеристика	Средние значения механических свойств			
			σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU_2 Дж/см ²
Балл 0		Структура – феррит с равномерно распределенными карбидами. Размер карбидов < 1 мкм	500...540	26...32	58...64	280...310
Балл 1		Структура – феррит и карбиды. Средний размер карбидов – 1...2 мкм	470...495	25...27	50...58	220...240
Балл 2		Структура – феррит и коагулированные карбиды, расположенные по границам зерен. Средний размер карбидов – 2...4 мкм	400...420	22...24	46...53	170...190
Балл 3		Структура – феррит и коагулированные карбиды, расположенные по границам зерен. Укрупнение карбидов в теле зерна. Средний размер карбидов – 4...8 мкм	355...370	21...22	40...45	90...110
Балл 4		Структура – феррит и коагулированные карбиды. Карбиды расположены по всему объему стали. Средний размер карбидов – 8...14 мкм	—*	—*	—*	—*
Требуемые значения механических свойств по ГОСТ 550 [4]		Структура – феррит с равномерно распределенными карбидами	≥ 392	≥ 22	≥ 50	≥ 118
* – При эксплуатации материал охрупчивается до такой степени, что изготовить образцы для испытаний не представляется возможным (при механической обработке происходит хрупкий излом заготовок).						

Установлена количественная взаимосвязь между предельным состоянием теплоустойчивых сталей 15ХМ, 15Х5М, 13Х9М, 10Х12В2МФ, 10Х13М1 и размером коагулированных карбидов металлов:

- при размере коагулированных карбидов в структуре стали 1...4 мкм (балл – 1 и 2) эксплуатация змеевика безопасна;

- при 4...8 мкм (балл – 3) дальнейшая эксплуатация безопасна при условии удовлетворительных результатов механических испытаний и сокращении времени до проведения следующего диагностирования материала;

- более 8 мкм (балл – 4) трубы змеевика подлежат замене (дальнейшая эксплуатация недопустима).

Заключение. Анализ изменения структуры и механических свойств исследованных сталей показал, что длительная эксплуатация теплоустойчивых сталей сопровождается деградацией структуры: коагуляцией карбидов, которая четко выявляется металлографическим анализом, в том числе и полевой металлографией непосредственно на объекте без вырезки образцов. При этом снижение механических свойств материала ниже минимальных допустимых значений явно заметно лишь на последних стадиях коагуляции карбидов (см. таблицу).

Разработана шкала деградации микроструктуры теплоустойчивых хромомолибденовых сталей, основанная на оценке размера коагулированных карбидов и значений механических свойств металла диагностируемого элемента конструкции (баллы от 0 (эксплуатация без ограничения по времени) до 4 (запрещение эксплуатации)).

Анализ микроструктуры сталей в полевых условиях с помощью переносного микроскопа является экспресс-методом контроля деградации и оценки состояния материала печных змеевиков. Применение экспресс-метода контроля материала длительно эксплуатируемых конструкций, заключающегося в сравнении структуры стали со шкалой баллов коагуляции карбидов, позволяет качественно оценить фактическое состояние материала и обеспечить дальнейшую безопасную работу технологического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ентус, Н.Р. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Н.Р. Ентус, В.В. Шарихин. – М.: Химия, 1987. – 304 с.
2. Hill, T. Heater Tube Life Management / T. Hill // National Petroleum Refiners Association Plant Maintenance Conference 22–25 May 2000 / ERA Technology. – Houston, 2000. – P. 30–49.
3. Хромченко, Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов / Ф.А. Хромченко. – М.: Машиностроение, 2002. – 352 с.
4. Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: ГОСТ 550. – М.: Изд-во стандартов, 1998 – 10 с.

Поступила 14.01.2015

CRITERIAL ESTIMATION OF STRUCTURE DEGRADATION OF THE HEAT-RESISTANT CHROME-MOLYBDENUM STEELS USED IN THE FIRED HEATERS COILS

A. KRYLENKO

In the article established the quantitative criterion for estimation the degree of degradation of heat-resistant chrome-molybdenum steels by the size of coagulated metal carbides in the microstructure and proposed scale of carbides coagulation, which allows to make objective decisions about the possibility of further safe operation of process equipment.

УДК 621.793.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОГО ХРОМИРОВАНИЯ В СИЛИКОТЕРМИЧЕСКИХ СМЕСЯХ

канд. техн. наук, доц. А.М. ДОЛГИХ; А.И. ЗАБАГОНСКИЙ; Е.И. ГАЙКЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается один из наиболее распространенных методов нанесения защитных покрытий – диффузионное хромирование, при котором возможно получить качественные слои на основе карбидов хрома, обладающие универсальными защитными свойствами, позволяющими снизить трение, повысить износостойкость, коррозионную и кавитационную стойкость. Этот процесс также обеспечивает повышенную устойчивость стали к газовой коррозии (окалиностойкость) при температуре до 800 °С. Показаны составы смесей для диффузионного хромирования на основе феррохрома. Более высокими экономическими показателями обладают металлотермические смеси с использованием в качестве восстановителя порошка алюминия. Логическим продолжением улучшения экономических показателей использования металлотермических смесей для хромирования является разработка и применение в качестве восстановителя недорогого и доступного порошка кристаллического кремния или еще более экономичных лигатур, например, силикокальция.

Технология нанесения защитных покрытий методом химико-термической обработки широкое применение получила в промышленности. Металлотермический метод наиболее часто применяется в черной и цветной металлургии и химии для получения металлов, ферросплавов и лигатур, может с успехом применяться для приготовления порошковых смесей, предназначенных для проведения процессов химико-термической обработки металлов и сплавов. Однако его применение требует проведения дополнительных исследований, так как в процессе прохождения реакции восстановления в ее классическом варианте развиваются температуры, превышающие температуру плавления наиболее применяемых в промышленности металлов и сплавов. В качестве восстановителя чаще всего используют порошок алюминия, но из-за его высокой стоимости разрабатываются более доступные и недорогостоящие варианты, например, с использованием кристаллического кремния или силикокальция. Для контролируемого снижения температуры в момент прохождения реакции восстановления, а также для уменьшения стоимости смеси, улучшения ее технологических характеристик (газопроницаемости, сыпучести) в состав смеси добавляют балластную добавку. В качестве такой добавки применяют окислы металлов и другие термически и химически устойчивые соединения. Процентное соотношение в составе смеси восстанавливаемого окисла (поставщика насыщающего элемента), восстановителя, балластной добавки и активатора (предназначенного для создания газовой среды в контейнере) определяет результаты процесса насыщения (глубину, фазовый состав слоя, его свойства).

Цель данной работы – исследовать особенности получения качественных карбидных слоев на основе карбидов хрома из силикотермических смесей.

Основная часть. Процесс диффузионного хромирования проводили в исходной смеси, состоящей из следующих компонентов: окиси хрома (Cr_2O_3 марки «ч» ГОСТ 2912-79) – поставщика насыщающего элемента (хрома); порошка кремния или силикокальция (ГОСТ 4762-71) – восстановителя; оксида алюминия (Al_2O_3 марки «ч» ГОСТ 8136-85) – балластной добавки; аммония хлористого (NH_4Cl марки «ч» ГОСТ 3773-72) – активатора процессов восстановления и насыщения.

При использовании в качестве восстановителя силикокальция марки СК25 основная реакция металлотермического восстановления окиси хрома имеет вид

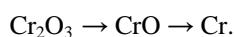


Стехиометрическое соотношение окиси хрома и кальция в смеси составляет 55,9 : 44,1. При использовании в качестве восстановителя порошка кристаллического кремния (ГОСТ 2169-69) реакция восстановления выглядит следующим образом:



Стехиометрическое соотношение окиси хрома и кремния в смеси равно 78,4 : 21,6. Кальций как восстановитель активнее кремния, поэтому в реакцию он вступает первым.

Наличие в системе «кислород – хром» низшего окисла CrO обуславливает протекание восстановления окиси хрома по схеме:



При этом стадия реакции $\text{CrO} \rightarrow \text{Cr}$ является лимитирующей, снижающей процент восстановления хрома. Добавка в смесь активаторов, вызывающая понижение температуры начала реакции восстановления смеси, повышает степень восстановимости окислов.

Влияние состава насыщающей смеси и условий насыщения на толщину хромированного слоя показано на рисунке 1.

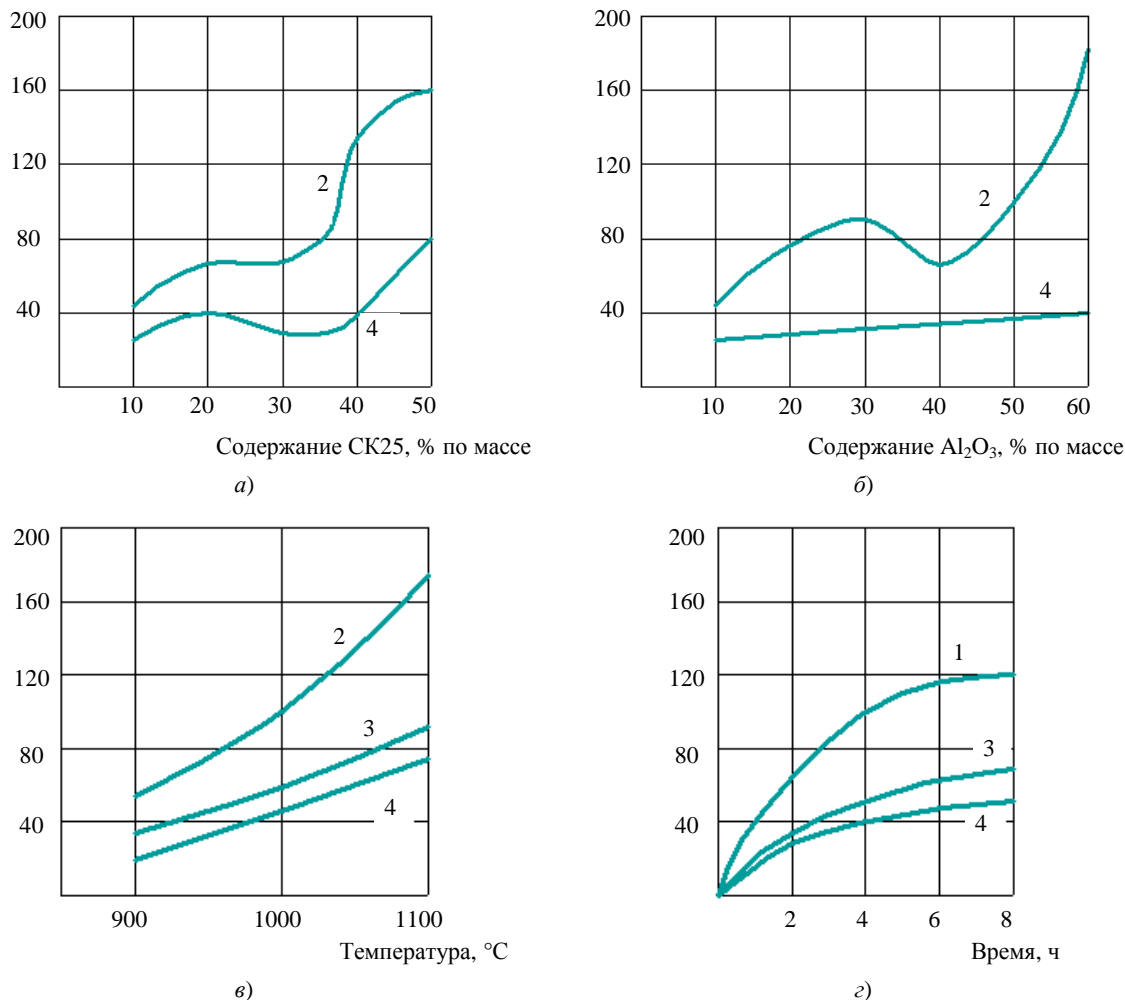
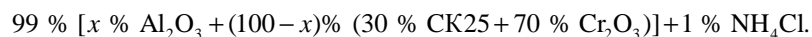


Рис. 1. Влияние состава смеси (*a*, $x = 40t = 1100^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ ч; *b*, $y = 30$, $t = 1100^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ ч) и условий насыщения (*в*, $x = 40$, $y = 25$, $\tau = 4$ ч; *г*, $x = 40$, $y = 25$, $t = 1100^\circ\text{C}$) на толщину хромированного слоя (восстановитель – силикокальций): 1 – армо-железо; 2 – сталь 08кп; 3 – сталь 45; 4 – сталь У10; состав смеси: $98\% [x\% \text{Al}_2\text{O}_3 + (100-x)\% \{y\% \text{CK25} + (100-y)\% \text{Cr}_2\text{O}_3\}] + 2\% \text{NH}_4\text{Cl}$

При содержании в смеси до 30 % силикокальция марки СК25 происходит практически чистое хромирование. Влияние процентного содержания балластной добавки показано на рисунке 1, б. При содержании в смеси выше 40 % Al_2O_3 на стали 08кп формируется хромосилицированный слой. Это свидетельствует о наличии в смеси свободного непрореагировавшего кремния, так как большое процентное содержание окиси алюминия в смеси снижает степень восстановимости окиси хрома и повышает концентрацию кремния в смеси.

Научный интерес также представляет исследование влияния процентного содержания балластной добавки на температуру начала реакции восстановления окиси хрома. Для замера температуры смеси фиксации времени начала инициирования реакции восстановления в смесь помещают термопару типа ПП, защищенную герметичной кварцевой трубкой. Температурно-временные параметры протекания реакции восстановления фиксировались с помощью профилограммы.

Состав исследуемой смеси:



Результаты проведенных исследований показаны в таблице 1.

Таблица 1

Влияние содержания балластной добавки (оксида алюминия) на температуру начала реакции восстановления окиси хрома

Содержание Al_2O_3 , x	10	20	30	40	50	60
Температура начала реакции восстановления, °С	1015	1000	1030	1050	1090	1100

Очевидно, что с увеличением процентного содержания балластной добавки в смеси температура начала реакции повышается. При этом повышение процентного содержания балластной добавки практически не оказывает влияния на толщину хромированного слоя на стали У10, так как углерод препятствует диффузии кремния, непрореагировавшего после восстановления исходной шихты.

Для повышения скорости формирования диффузионных слоев на поверхности сталей, образования летучих газовых соединений металлов применяют активаторы различного вида.

При использовании в качестве активатора хлористого аммония в смеси термодинамически возможно протекание следующих реакций:



Кроме того, на поверхности насыщаемой детали имеют место реакции обмена:



Типы активаторов, их процентное содержание в насыщающей смеси оказывают значительное влияние на результаты процесса насыщения.

На рисунке 2 показано влияние активаторов на толщину хромированного слоя.

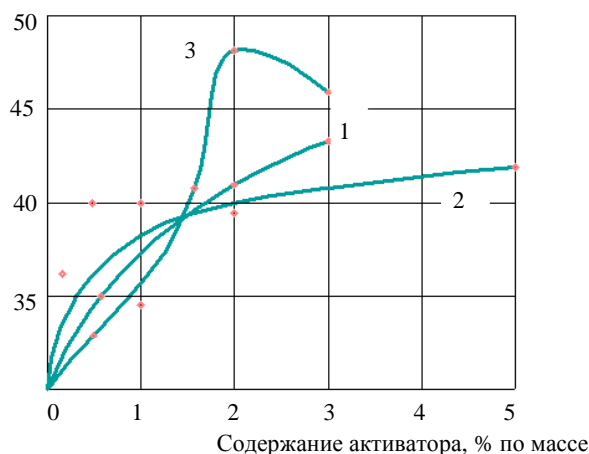


Рис. 2. Влияние активатора (А) на толщину хромированного слоя на стали У10:
1 – NH_4Cl ; 2 – AlF_3 ; 3 – NaF . Условия насыщения: $t = 1100$ °С, $\tau = 4$ ч;
состав смеси: $(100 - n) \% [40 \% Al_2O_3 + 60 \% (25 \% CK25 + 75 \% Cr_2O_3)] + n \% A$

Изменение процентного содержания NH_4Cl и AlF_3 (марки «ч», ГОСТ 3773-72) оказывает незначительное влияние на толщину получаемого диффузионного слоя, его микротвердость и качество поверхности. Повышение толщины слоя при введении в состав насыщающей смеси активатора NaF (марки «ч»),

ГОСТ 4463-76) происходит за счет резкого увеличения толщины зоны твердого раствора хрома в железе, при некотором снижении микротвердости карбидной зоны слоя (с $H_{\square} = 16500 \dots 17800$ МПа при добавке хлористого аммония или фтористого алюминия до $H_{\square} = 14200 \dots 15200$ МПа). По качеству поверхности, микротвердости полученных диффузионных слоев выбираем для насыщения активатор NH_4Cl . Наиболее стабильные и качественные результаты получены при проведении процесса хромирования в смеси состава:



Рост толщины хромированного слоя в зависимости от температуры и времени насыщения удовлетворительно подчиняется экспоненциальному и параболическому законам соответственно (рис. 1 в, г). Структуры хромированных слоев, образующихся в смеси оптимального состава при температуре насыщения 1100°C на сталях марок 08кп и У10, показаны на рисунке 3.

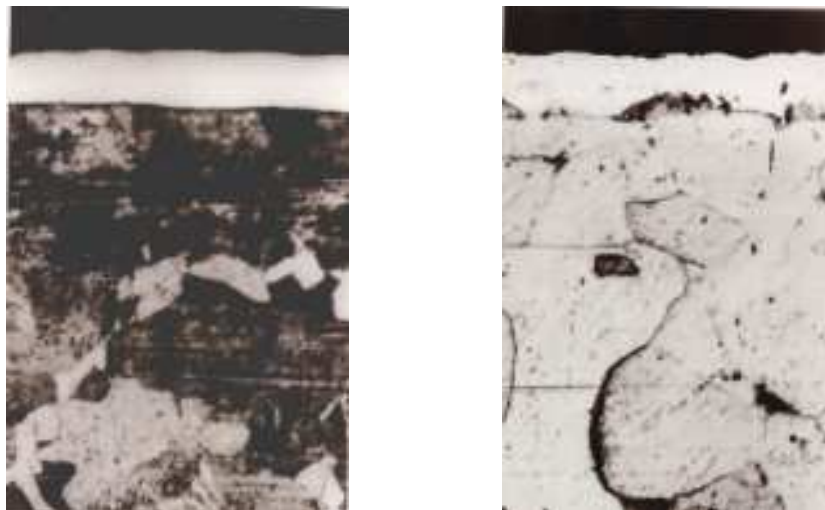


Рис. 3. Микроструктуры хромированных слоёв ($\times 200$)

На сталях 08кп и У10 формируется двухфазный слой, состоящий из карбидной зоны, содержащей $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$; $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_6$, и зоны α -твердого раствора хрома в железе. Микротвёрдость карбидной зоны на У10 составляет $H_{\square} = 16500 \dots 17800$ МПа; микротвёрдость слоя α -твердого раствора для стали 08кп – $H_{\square} = 1800 \dots 2200$ МПа, стали У10 – $H_{\square} = 3400 \dots 5600$ МПа.

Результаты исследований влияния состава насыщающей смеси и условий насыщения на толщину хромированного слоя при использовании в качестве восстановителя кристаллического кремния Кр1 показаны на рисунке 4.

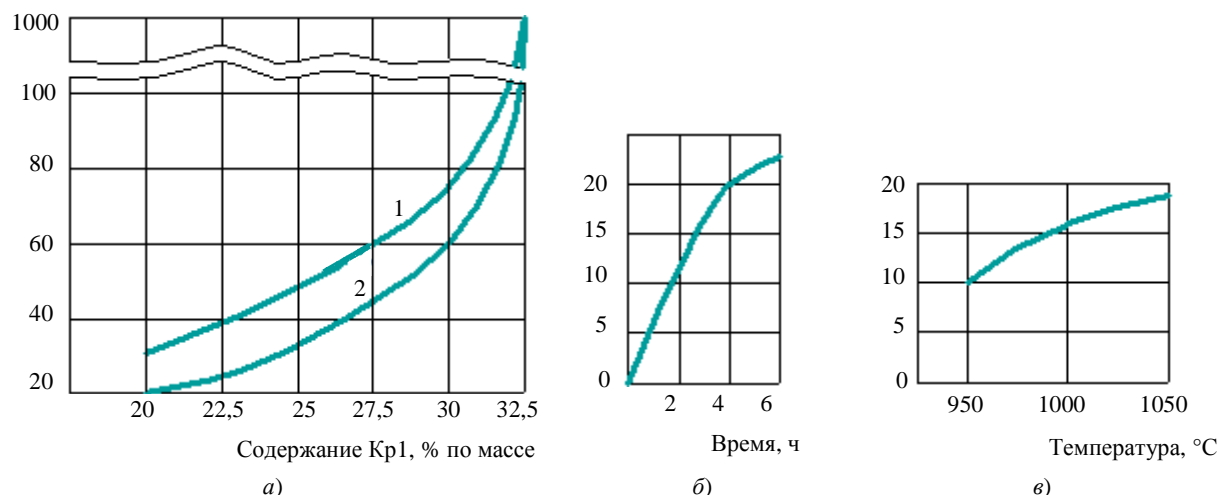


Рис. 4. Влияние состава смеси (а, $t = 1100^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ ч) и условий насыщения (в, $y = 20$, $t = 1100^\circ\text{C}$; г, $y = 20$, $\tau = 4$ ч) на толщину хромированного слоя (восстановитель – кремний): 1 – сталь; 2 – сталь У10; состав смеси: $98 \% [30 \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 70 \% (20 \% \text{Кр1} + 80 \% \text{Cr}_2\text{O}_3)] + 2 \% \text{NH}_4\text{Cl}$

При содержании Кр1 в смеси по отношению к Cr_2O_3 до 23 % происходит практически чистое хромирование. Для наиболее полного восстановления окислов необходимо обеспечить достаточную контактную поверхность, что в первую очередь зависит от степени измельчения (дисперсности) частиц. Дисперсность компонентов смеси перед восстановлением также обуславливает и получение стехиометрического соотношения компонентов в каждой порции взаимодействующих реагентов. Результаты исследования влияния фракционности порошка кремния на толщину диффузионного хромированного слоя показаны в таблице 2.

Таблица 2

Влияние фракционности кремния на толщину хромированного слоя

Размер фракции кремния Si1, мм	Качество поверхности образцов после насыщения	Толщина слоя, мкм
0,4...0,6	следы налипания смеси	10, неравномерный
0,15...0,4	хорошее	14
менее 0,15	хорошее	16

Приемлемым для приготовления насыщающих смесей является порошок кремния с размерами частиц менее 0,4 мм. Уменьшение размера частиц способствует получению более активной насыщающей смеси. Исследование влияния фракционности Кр1 проводили в смеси состава:



Влияние активаторов на толщину хромированного слоя отображено на рисунке 5. Наиболее качественные, плотные слои, имеющие высокую микротвердость, получаются при использовании в качестве активатора NH_4Cl . Оптимальный с этой точки зрения состав насыщающей смеси:

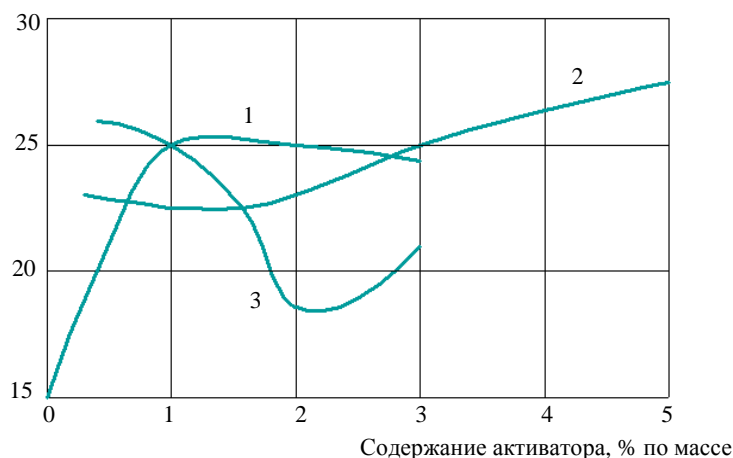
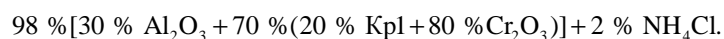
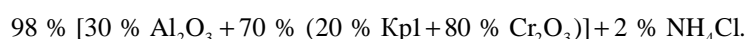


Рис. 5. Влияние активатора (А) на толщину хромированного слоя на стали У10:
1 – NH_4Cl ; 2 – AlF_3 ; 3 – NaF . Условия насыщения: $t = 1100^\circ\text{C}$; $\tau = 4$ ч;
состав смеси: $(100 - n) \% [30 \% \text{Al}_2\text{O}_3 + 70 \% (20 \% \text{Кр1} + 80 \% \text{Cr}_2\text{O}_3)] + n \% \text{A}$

Структура, фазовый состав и микротвердость полученных хромированных слоев идентичны фазовому составу, микроструктуре и микротвердости хромированных слоев, полученных при насыщении из смесей с применением в качестве восстановителя силикокальция СК25. Рост толщины хромированного слоя в зависимости от температуры и времени насыщения удовлетворительно подчиняется экспоненциальному и параболическому законам соответственно (см. рис. 4, б, в).

Проведено исследование фазового состава и текстурированности полученных хромированных слоев на стали У10 в зависимости от содержания восстановителя. Смесь для исследования имела состав:



Принятое содержание Кр1 по отношению к Cr_2O_3 : 20 : 80; 25 : 75; 30 : 70.

На рисунке 6 показаны микроstructures хромированных слоев.

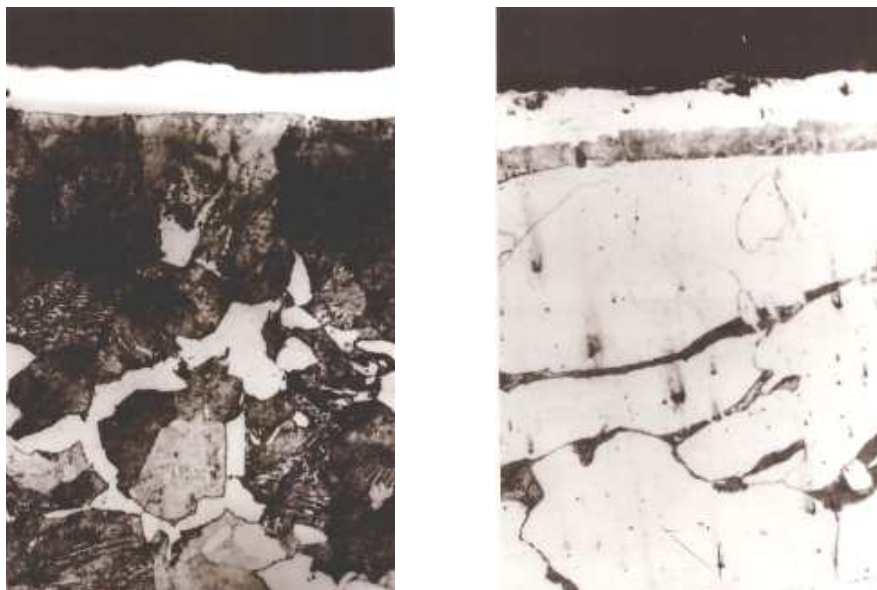


Рис. 6. Микроstructures хромированных слоев ($\times 200$)

Результаты проведенных исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3

№	Θ	d/n, Нм	d/n, Нм	J, %	Фаза	HKL	$J_{\text{омп}}$, мм, при соотношении окислов в смеси			
							$\frac{20\text{TiO}_2}{80\text{Cr}_2\text{O}_3}$	$\frac{40\text{TiO}_2}{60\text{Cr}_2\text{O}_3}$	$\frac{60\text{TiO}_2}{40\text{Cr}_2\text{O}_3}$	$\frac{80\text{TiO}_2}{20\text{Cr}_2\text{O}_3}$
1	27,3	0,2497	0,249	75	TiC	111	–	–	–	6
2	28,65	0,2359	0,2375	25	Cr ₂₃ C ₆	420	50	18	18	–
3	31,75	0,2177	0,2168	25	Cr ₂₃ C ₆	422	67	20	22	–
4	32,00	0,2162	0,215	100	TiC	200	–	–	–	10
5	32,75	0,2117	0,212	25	Cr ₇ C ₃	202	125	30	31	34
6	33,90	0,2054	0,2044	100	Cr ₇ C ₃	–	20	30	70	3
7	37,40	0,1886	0,1878	20	Cr ₂₃ C ₆	440	63	10	19	–
8	39,10	0,1816	0,181	25	Cr ₇ C ₃	402	48	11	11	–
9	39,40	0,1805	0,1796	25	Cr ₂₃ C ₆	531	81	17	15	4
10	45,40	0,1609	0,1602	10	Cr ₂₃ C ₆	622	14	4	4	–
11	48,50	0,1529	0,152	50	TiC	220	–	–	–	5
12	57,95	0,1351	0,135	10	Cr ₇ C ₃	811	23	7	5	–
13	65,70	0,1257	0,1252	30	Cr ₂₃ C ₆	822,660	48	11	13	–
14	68,40	0,1232	0,1227	15	Cr ₂₃ C ₆	555,751	32	8	8	1
15	71,20	0,1210	0,1225	5	Cr ₇ C ₃	10,0,0	41	12	10	–
16	74,15	0,1191	0,166	15	Cr ₇ C ₃	–	20	10	8	–
17					Cr ₂₃ C ₆		478	156	112	5
18					Cr ₇ C ₃		277	100	135	6
19					TiC		–	–	–	21
20					$\Sigma\text{Cr-C}$		755	256	247	11
21					Cr ₂₃ C ₆		2,22	1,43	1,76	10
22					Cr ₂₃ C ₆		4,06	2,70	2,07	4,5
23					Cr ₇ C ₃		1,56	0,99	0,73	–
24					$\Sigma\text{Cr-C}$		7,84	5,12	4,56	14
25					TiC					1,35
26										1,35
27										1,08
28										3,78

Таким образом, можно сделать следующие *выводы*:

- все карбиды хрома отчетливо аксиально текстурированы, причем степень совершенства текстур возрастает по мере сдвига в сторону более высокоуглеродистого карбида;
- текстура Cr_{23}C_6 не менее чем трехкомпонентна, и ни одна из компонент отчетливо не преобладает;
- текстура Cr_7C_3 – двухкомпонентна с преобладанием одной компоненты – (101) или (201);
- фаза Cr_3C_2 текстурирована остро и всегда одинаковым образом – параллельно насыщаемой поверхности располагаются плоские сетки (301).

Заключение. Проведенное исследование свидетельствует о возможности получения удовлетворяющих требованиям карбидных слоев диффузионного типа из металлотермических смесей с использованием в качестве восстановителя кристаллического кремния и силикокальция. Изучено влияние активаторов различного типа на толщину и фазовый состав полученного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгих, А.М. Свойства спеченных твердых сплавов с нанесенными карбидными слоями / А.М. Долгих // Вестн. Полоц. гос ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 38–42.
2. Долгих, А.М. Химико-термическая обработка материалов: учеб.-метод. компл. / А.М. Долгих. – Новополоцк: ПГУ, 2010. – 224 с.

Поступила 15.01.2015

RESEARCH OF DIFFUSION CHROME PLATED PROCESS IN SILICOTHERMIC MIXTURES

A. DOLGIH, A. ZABAGONSKYI, E. GAIKEVICH

Technology application of protective coatings by chemical-thermal treatment was used in industry. One of the most common methods – diffusion chrome delivers quality-based layers of chromium carbides with universal protective properties. These layers reduce friction and increase wear resistance, corrosion and cavitation resistance. This process also provides increased resistance to gas corrosion of steel (scaling resistance) at temperatures up to 800 °C. Known compositions of mixtures for the diffusion of chromium plating on the basis of ferrochrome. Higher economic indicators have metallothermal mixture using as a reducing agent of aluminum powder. Logical continuation of improving economic performance metallothermal use mixtures of chromium plating is to develop and use as a reductant cheaper and affordable powder or crystalline silicon more economical alloys, such silicocalcium.

УДК 621.792

**КОНСТРУИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛООТХОДОВ**

*канд. техн. наук Т.В. ВИГЕРИНА;
канд. техн. наук О.П. ШТЕМПЕЛЬ; канд. техн. наук В.А. ФРУЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены антифрикционные материалы, работающие при высоких скоростях скольжения и больших давлениях. Проанализированы причины высокой износостойкости антифрикционных материалов в таких условиях. Разработана технология нанесения износостойкого композиционного материала, полученного из металлоотходов с последующим экономным легированием исходного материала в подвижных расходуемых смесях. Показана возможность получения антифрикционного материала со структурой, подобной структурам Шарпи I типа, не уступающего по износостойкости антифрикционным бронзам. Химический состав, структуру и свойства нанесенного на рабочую поверхность композиционного материала можно варьировать в широком диапазоне, подбирая оптимальные параметры для конкретных условий. Доказывается целесообразность использования в ремонтном производстве предприятий технологии получения композиционного материала на основе металлоотходов с применением термомодиффузионного легирования.

Введение. В последнее время для ремонтной отрасли Республики Беларусь отчетливо прослеживается тенденция тривиальной замены изношенной детали без попыток ее восстановления. Учитывая отсутствие собственной сырьевой базы и ограниченность ресурсов, такой подход представляется недалеким. Предлагается использование металлической стружки, в избытке имеющейся на металлообрабатывающих предприятиях Беларуси, для восстановления рабочих поверхностей изношенных деталей. Возможность и целесообразность возрождения ремонтно-механической базы республики неоднократно доказывалась ведущими белорусскими учеными. Возможность замены известных дорогостоящих антифрикционных материалов на композиционные с основой из металлоотходов ранее обосновывалось в работах [1; 2].

Нами предпринята попытка анализа требований к паре трения с выдачей рекомендаций по синтезу антифрикционного материала на основе металлоотходов. Цель данной работы – дать рекомендации по конструированию композиционного антифрикционного материала и метода его нанесения.

Исследовательская часть. Выбор материала для восстановительного покрытия основывается на следующих исходных данных:

- условия работы детали (нагрузка, вид изнашивания);
- материал восстанавливаемой детали;
- критерии надежности восстановленной детали;
- предпочтительные процессы при восстановлении;
- стоимость восстановления.

Основными критериями при выборе наносимого материала являются химический состав, 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. Для придания антифрикционных свойств рекомендуется введение меди.

Материал покрытий должен обеспечивать повышение усталостной прочности детали. Наличие легирующих элементов значительно повышает остаточные напряжения, а присутствие в покрытии карбидов является дополнительным источником для возникновения усталостных трещин. Для того чтобы снизить разницу в физико-механических характеристиках материалов покрытия и основы, но при этом получить твердость на уровне 28...35 HRC, в качестве материала для нанесения были предложены проволока из высокоуглеродистой стали мартенситного класса.

При нанесении в зонах, нагреваемых до температуры выше фазовых превращений, вследствие ускоренного охлаждения как в нанесенном металле, так и в переходной зоне протекают следующие процессы:

- выгорание легирующих элементов;
- возникновение внутренних остаточных напряжений;
- образование неравновесных структур, таких как пересыщенные углеродом и легирующими элементами твердые растворы;
- увеличение размеров зерна, которое оказывает неоднозначное влияние на эксплуатационные свойства валов.

Вышеперечисленные процессы в различной степени влияют на микроструктуру покрытия, а следовательно и на эксплуатационные свойства детали в зависимости от материала покрытия. При этом не-

равновесные метастабильные структуры покрытий, с одной стороны, обеспечивают высокую твердость, прочность и износостойкость, а с другой – увеличенные размеры зерна и внутренние остаточные растягивающие напряжения снижают сопротивление циклическим нагрузкам.

Изначально была поставлена цель – получить максимально низкий по стоимости материал, обладающий трибофизическими свойствами не ниже известных антифрикционных материалов на основе меди.

За основу материала приняли стружечные отходы чугунов, в избытке имеющиеся на металлообрабатывающих предприятиях. Для получения искомым свойств износостойкости и антифрикционности вводили диффузионным путем легирующие элементы.

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 процесс распада мартенсита, а также способствует увеличению дисперсности структуры. Под влиянием хрома значительно повышается твердость и прочность мартенсита. Наибольшее влияние хрома на эксплуатационные свойства износостойких сплавов проявляется при наличии углерода. Высокий уровень эксплуатационных свойств сплавов Fe-Cr-C обусловлен количеством, размерами, морфологией и микротвердостью карбидов и металлической основы. В наплавленном металле хром может образовывать следующие карбиды: орторомбический Cr_3C_2 , тригональный Cr_7C_3 и кубический $Cr_{23}C_6$. Карбид первого типа в сплаве Fe-Cr-C встречается редко. Как правило, при содержании хрома менее 7 % образуются карбиды, легированные хромом. В цементите может растворяться до 20 % хрома. При содержании хрома более 8 % в чугуне с 3 % углерода количество карбидов цементитного типа уменьшается за счет образования карбидов Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$. Именно эти карбиды и предпочтительны в износостойких сплавах.

Основной путь регулирования количества и типа карбидов в износостойких сплавах – выдерживание требуемого соотношения Cr/C в сплаве. В экономнолегированных износостойких сплавах необходимое количество, тип и морфология карбидных фаз формируются за счет рационального легирования более сильными карбидообразующими элементами, такими как ванадий, титан, вольфрам и молибден. В этом случае образуются преимущественно карбиды M_6C и M_3C , способствующие повышению эксплуатационных характеристик сплавов.

Эффективным приемом регулирования количества, морфологии и типа карбидной фазы в хромистых износостойких сплавах является термическая обработка. С увеличением количества хрома ухудшается свариваемость, повышается вероятность образования трещин в покрытиях.

Бор, несмотря на малый атомный радиус (0,09 нм), малорастворим в большинстве металлов, применяемых для восстановления деталей (хром, железо, кобальт, никель, медь, вольфрам). При легировании бором этих металлов образуются высокотвердые бориды Me_xB_y , которые способствуют резкому повышению твердости сплава. Высокая микротвердость боридов (12000...37000 МПа) и малая растворимость бора в металлах обеспечивает 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.

Бор – дорогостоящий легирующий элемент, содержание его в количестве 0,001...0,015 % масс. повышает 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.

Титан обладает способностью образовывать прочные и тугоплавкие карбиды. Твердость монокарбида титана составляет 28 ГПа, а температура плавления достигает 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.

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 микротвердость. Прокаливаемость марганцевых сталей увеличивается вследствие снижения критических точек из-за замедленной диффузии углерода в аустените. Однако марганец при содержании в больших количествах ухудшает наплаваемость, способствуя образованию горячих трещин.

Большинство наплавочных сплавов содержит углерод. Широкое применение углерода обусловлено его малой стоимостью и высоким упрочняющим воздействием. При доэвтектическом содержании углерода (< 0,8 %) формируется покрытие, обладающее высокой ударостойкостью при сравнительно высокой износостойкости. При большем содержании углерода и наличии карбидообразующих металлов существенно возрастает износостойкость, особенно абразивная, однако стойкость к ударным нагрузкам снижается. Углерод резко снижает коррозионную стойкость покрытий. Содержание углерода более 1,2 %

применяется редко. На технологические свойства сплавов углерод оказывает отрицательное воздействие, ухудшает свариваемость и увеличивает склонность к трещинообразованию.

Для повышения прочности материала и повышения его антифрикционных свойств рекомендуют легирование композиционного материала медью [4]. Разные авторы [5–7] приводят значения содержания меди от 0,5 до 30 % для получения наилучших характеристик антифрикционных свойств. При таком легировании материалы способны работать при статических режимах $p = 280$ МПа, однако величина $p \nu$ для этих материалов не превышает 2 МПа·м/с.

Как отмечает один из авторов [8], в железе растворяется 0,15 % меди, все избыточное ее количество концентрируется во вторичной фазе, располагающейся в основном вдоль границ зерен.

Сравнительный анализ влияния меди на структурообразование и свойства порошковых композиционных материалов свидетельствует о следующем: в порошковых композиционных материалах не происходит полного расплавления меди, графитизирующее и упрочняющее ее влияние минимально, также не наблюдается аустенитно-стабилизирующий эффект, следовательно, в данном случае речь может идти преимущественно о повышении антифрикционных свойств материала и его демпфирующих свойств в композиции.

Материал покрытий должен обеспечивать повышение усталостной прочности детали. Наличие легирующих элементов значительно повышает остаточные напряжения, а присутствие в покрытии карбидов является дополнительным источником для возникновения усталостных трещин. Наплавочные материалы, используемые для нанесения износостойких покрытий, обеспечивают покрытиям высокие твердость и износостойкость, что в значительной степени затрудняет их обработку резанием. 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.

Покрытия, полученные в результате наплавки образцов порошковой проволокой ПП-Нп-80Х20РЗТ, отличаются высокой твердостью и износостойкостью, но при этом они характеризуются повышенной хрупкостью, вследствие чего снижают усталостную прочность детали, так как сопротивление росту трещин у материала этих покрытий минимально. Основной металл в зоне термического влияния охрупчен, потому что покрытие получено со значительным тепловложением [9]. Из числа рассматриваемых покрытие из порошковой проволоки ПП-Нп-80Х20РЗТ обладает наибольшей твердостью HRC 55...60 за счет высокого содержания углерода и дополнительного легирования бором. На микроструктуре (рис. 1, а) наблюдается переходная зона толщиной 50...70 мкм. Материал покрытия и материал основы значительно отличаются друг от друга по химическому составу.

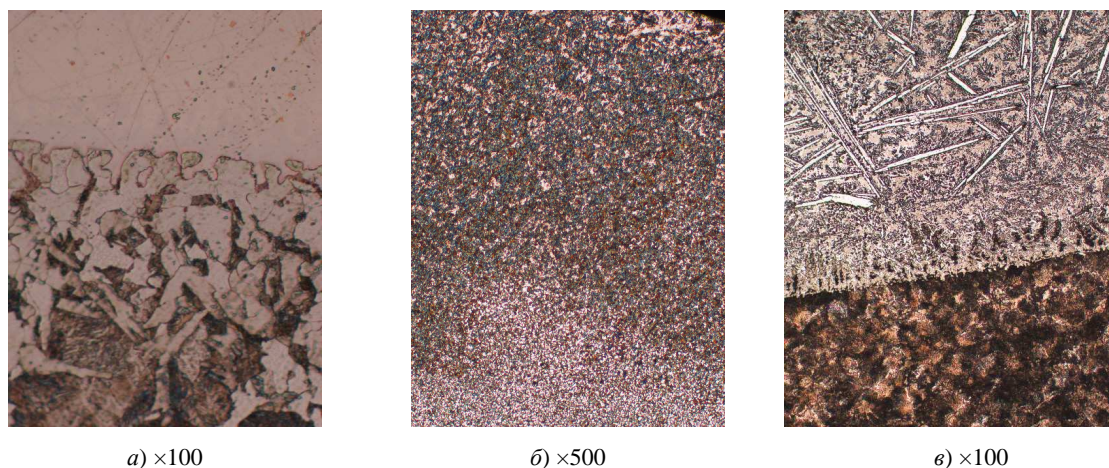


Рис. 1. Микроструктура материалов основы и покрытия в результате наплавки проволоками: ПП-Нп-80Х20РЗТ (а); Св08Х13 (б); У7 (в)

Как видно на рисунке 1, в микроструктура покрытия проволокой У7 однородна с микроструктурой основы и переход от основного металла к наплавленному визуально определяется лишь размером зерен. Проволока не содержит карбидообразующих легирующих элементов, поэтому при наплавке происходит более интенсивное выгорание углерода, а также его диффузия в подложку (сталь 45), что приводит к снижению твердости материала покрытия до HRC 28...32, но при этом усталостная прочность образцов повышается. Значения микротвердости изменяются незначительно – от 1500 до 1900 МПа. На микроструктуре материала покрытия, наплавленного проволокой Св-08Х13 (рис. 1, б), переходная зона ярко выражена и достигает толщины 10...15 мкм, но так как она характеризуется низкими значениями твердости 1500...1900 МПа,

то предел выносливости образцов примерно равен пределу выносливости образцов, наплавленных проволокой У7. В данном случае полученные значения предела выносливости больше в 1,5 раза, чем предел выносливости образцов, наплавленных проволокой ПП-Нп-80Х20Р3Т, что объясняется меньшими размерами переходной зоны и значениями микротвердости ее материала.

Сравнение микроструктур, полученных наплавкой проволоки различного состава (см. рис. 1), характера распределения микротвердости по глубине наплавленного покрытия и значений предела выносливости образцов с наплавленными покрытиями, показывает, что строение переходной зоны и градиент свойств покрытия и детали оказывают решающее влияние на процесс усталостного разрушения.

Влияние бора, по мнению исследователей [10; 11], во многом аналогично влиянию марганца. Исходя из этого попытаемся при помощи экономного диффузионного легирования создать гамму порошковых материалов с различной структурой и способных работать в различных условиях. За основу возьмем материал, имеющий заэвтектоидную структуру, но с достаточно мягкой матрицей, и диффузионным путем введем в нее медь и бор.

Структура получаемого композиционного материала зависит как от технологических параметров нанесения, так и от толщины диффузионной оболочки [12] и количества меди.

Поскольку существует взаимосвязь между химическим составом, структурой и свойствами (износостойкостью, антифрикционностью и др.), представляется возможным, изменяя режимы нанесения материала, управлять свойствами рабочих слоев в целом. Любое изменение режимов нанесения материала оказывает влияние на структурные изменения в получаемом материале. Проанализируем влияние различных значений силы тока на структурообразование материалов (табл. 1).

Таблица 1

Влияние силы тока на свойства композиционного материала из диффузионно-легированной проволоки У7 (дистанция напыления 100 мм)

Диффузионно введенные легирующие элементы	Сила тока, А	Микродюрометрические характеристики фаз		Твердость наплавленного материала, HRC
		микротвердость H_{20} , МПа	количество, %	
Отсутствуют	240	До 2000	3	27 ± 14
		2000...4000	49	
		4000...6000	48	
Бор	240	2000...4000	18	28 ± 14
		4000...6000	82	
Бор, медь	240	2000...4000	50	29 ± 14
		4000...6000	50	
Бор, медь	280	2000...4000	34	36 ± 18
		4000...6000	54	
		> 6000	12	
Бор, медь	200	До 2000	1	25 ± 13
		2000...4000	63	
		4000...6000	36	

Материал из исходной проволоки содержит минимальное количество структурных составляющих, обладающих малой твердостью, а также эвтектики, сосредоточенной по границам ламелей. Карбидные включения находятся как по границам ламелей, так и по периметру пор и неметаллических включений. Введение в состав материала бора ведет к повышению микротвердости структурных составляющих. Наличие легкоплавких эвтектик по границам ламелей косвенно свидетельствует о наличии соединений бора. В целом структура материала является типично эвтектоидной. При одинаковых параметрах диффузионного легирования на структуру и свойства композиционного материала решающее влияние оказывает метод его нанесения. Твердость наплавленного слоя составляет $39,0 \pm 40$ HRC. Микротвердость H_{50} структурных составляющих: эвтектоида 7270 ± 710 МПа, боридов 12100 ± 140 МПа [13]. Таким образом, структура наплавленного композиционного материала характеризуется выраженной структурной наследственностью по отношению к диффузионно-легированной структуре. Полученная композиционная структура сохраняет структурные элементы – бориды, феррито-перлитное ядро. Происходит лишь оплавление боридной оболочки. Высокая степень гетерогенности структуры композиционного материала обеспечивает повышение макротвердости более чем на 30 % по сравнению с исходным материалом.

При введении меди и неизменной силе токе происходит измельчение структуры материала, появляется сетка карбидов по границе зёрен, наблюдается измельчение эвтектики, которая в данном случае расположена по всему объему структуры, локальные включения меди располагаются в основном по периметру и внутри пор и ламелей. Введение меди ведет к аустенизации материала, о чем могут свидетельствовать нехарактерные для мартенситных включений значения микротвердости. Эвтектика также обла-

дает недостаточной микротвердостью, что свидетельствует как о неполном протекании мартенситного превращения, так и о метастабильности получившейся структуры. При увеличении силы тока напыления до 280 А наблюдается полный переплав материала, что позволяет говорить о «жестких» режимах нанесения (рис. 2). При этом наблюдаются участки переплава материала. Медные частицы окружены оболочкой из легкоплавких фаз и располагаются обособленно. Структура слоя заэвтектоидная. Перегрев и высокая скорость охлаждения ведут к заметному укрупнению карбидных фаз. Повышение микротвердости эвтектоида свидетельствует о возрастании доли мартенситной составляющей. Повышение микротвердости матричной составляющей обусловлено влиянием бора.

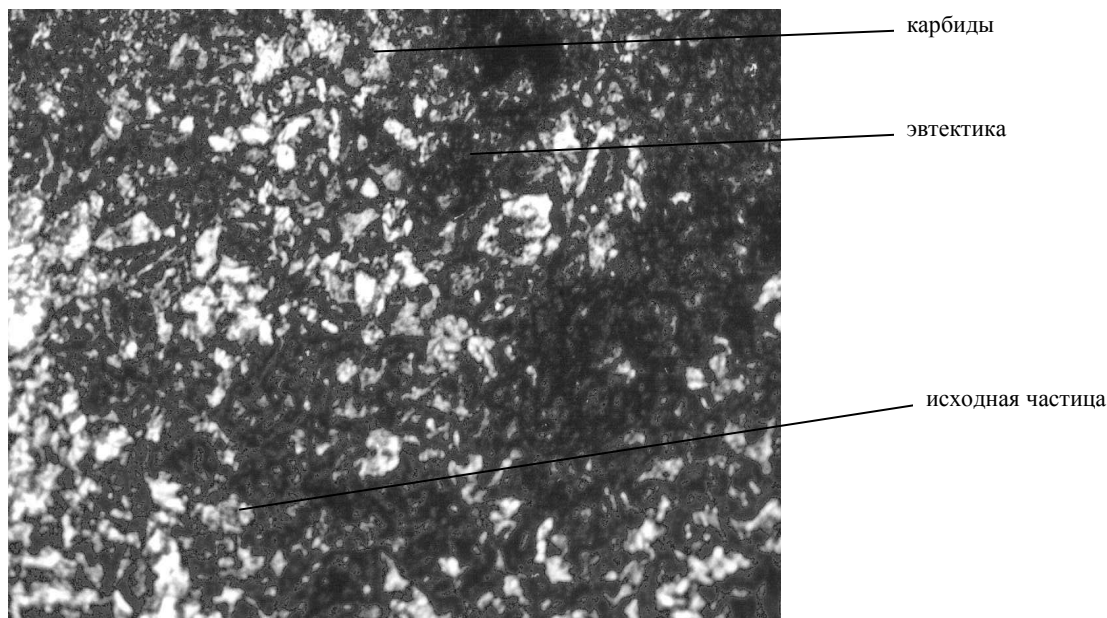


Рис. 2. Структура композиционного материала из диффузионно-легированной проволоки У7 + В + Сu при силе тока 280 А ($\times 100$)

При снижении силы тока до 200 А наблюдается укрупнение структурных составляющих, снижение микротвердости и твердости материала в целом. Прослеживается наличие большого количества неметаллических включений и пор. Таким образом, как увеличение силы тока, так и ее уменьшение ведут к увеличению неоднородности структуры, а следовательно и к большому разбросу свойств, что в целом негативно сказывается на работоспособности материала. Усталостная прочность в целом изменяется мало, поскольку основа материала претерпевает незначительные изменения.

Таким образом, влияние переходной зоны на усталостную прочность наплавленных деталей можно объяснить следующими ее характеристиками:

- существенными различиями свойств материалов основы и покрытия;
- неблагоприятными растягивающими напряжениями после наплавки;
- накоплением большого количества дефектов кристаллической решетки.

Рассмотрим *триботехнические характеристики материалов*. Наибольшее влияние на износостойкость наплавленного металла оказывают карбиды и бориды. Медные включения больше оказывают влияние на антифрикционную составляющую материала [14]. С одной стороны, влияние легирующих элементов на износостойкость поверхностей в результате изменения природы карбидной фазы или других твердых частиц связано с изменением их твердости и сопротивления разрушению. С другой стороны, легирующие элементы оказывают влияние и на свойства матрицы сплава, которое связано главным образом с изменением устойчивости аустенита и изменением продуктов распада при его охлаждении после наплавки и сдвигом влево критической точки эвтектоидного и эвтектического превращений на диаграмме «железо – углерод».

Карбиды и бориды в наплавленном металле являются основной фазой, оказывающей сопротивление действию твердых абразивных частиц, поэтому покрытие с такими частицами обладает максимальной износостойкостью (рис. 3). Карбиды связаны матрицей, свойства которой имеют двойное значение. Она скрепляет карбиды и сама противодействует изнашиванию. Микротвердость ферритно-мартенситной матрицы $H_{\square} = 8500 \dots 8750$ МПа обеспечивает сопротивление изнашиванию, хорошее закрепление карбидов и сопротивление металла ударным нагрузкам. При наплавке образца проволокой У7 вследствие высокой скорости охлаждения покрытия в нем образуются закалочные мартенситно-трооститные структуры. В этом

случае твердость наплавленного покрытия определяется содержанием углерода в исходном материале (чем выше содержание углерода, тем выше твердость покрытия). Твердость покрытия, наплавленного проволокой У7, составляет HRC 35...40. Структура полученного порошкового покрытия гетерогенная и состоит из твердых частиц, выдерживающих нагрузку на вал, и мягкой, истирающейся в работе составляющей, которая обеспечивает наличие масла в местах выработки.

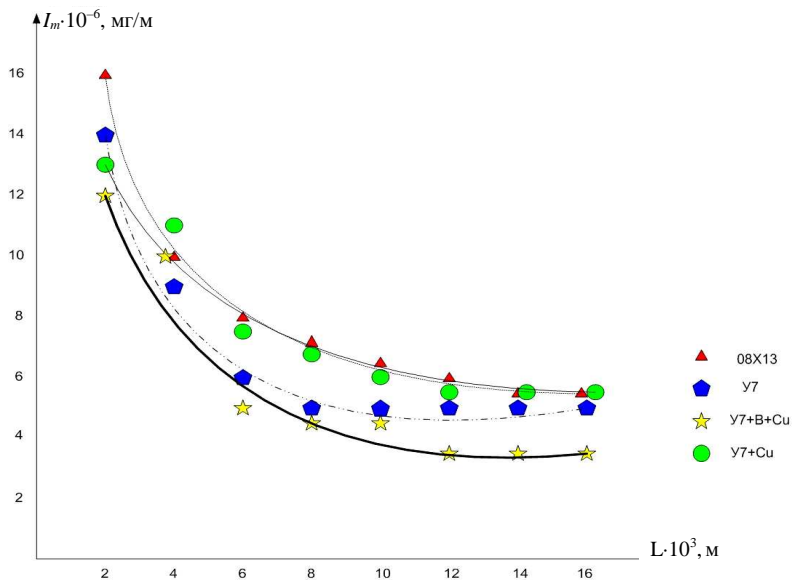


Рис. 3. Зависимость интенсивности изнашивания I_m покрытия образца, наплавленного различными материалами, от пути трения L

На рисунке 4 прослеживается расположение меди между спеченными частицами, что обусловлено их исходной формой и играет важную роль в процессе триботехнического взаимодействия деталей. Отсутствие меди в поверхностном слое объясняется, скорее всего, интенсивным ее выгоранием. Ближе к подложке прослеживаются следы меди, а также локальные участки сплошной меди, что свидетельствует о ее начальном обособленном расположении.

Тепловой режим пары трения обусловлен соотношением конкурирующих процессов тепловыделения и теплопередачи. При относительно постоянных показателях тепловыделения решающее значение имеет теплопередача. Медь, обладая высокой теплопроводностью, увеличивает теплоотвод из зоны трения в соединении и снижает температуру материала в контакте [6], тем самым повышая износостойкость.

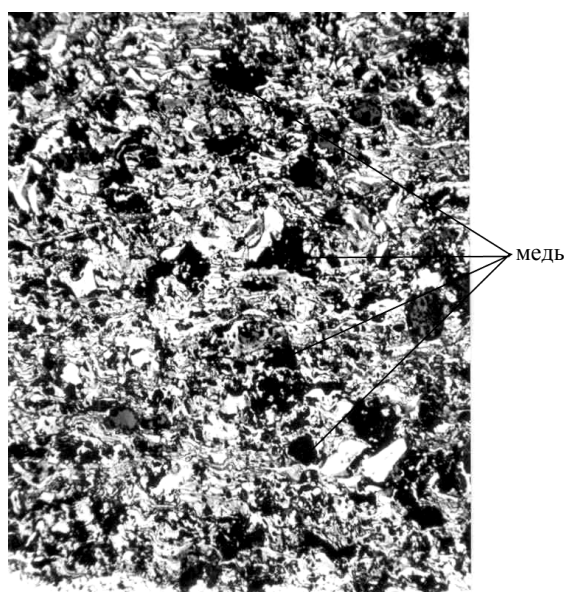


Рис. 4. Общий вид материала покрытия ($\times 100$), полученного наплавкой из смеси порошков ПГ-10Н-01, железного ПЖ-5М, медного ПМС-1 и никель-алюминиевого ПТ-НА-01

Влияние процентного содержания меди в покрытии на интенсивность изнашивания отображено в таблице 2.

Таблица 2

Влияние химического состава покрытия из диффузионно-легированного материала на износостойкость пары трения (путь трения 6000 м)

% по массе В	% по массе Си	Твердость вкладыша, НВ	Износ вала/вкладыша, мг/м·10 ⁻⁶	Износостойкость пары трения, м/мг·10 ⁶
6	25	390	58,9/1,43	0,017
4	25	187	14,6/1,95	0,06
4	10	207	5,45/2,11	0,132
1	25	248	37,5/2,24	0,025
1	10	183	9,26/1,98	0,089
1,8	18	159	0,651/1,7	0,39

Таким образом, выявлено, что при содержании бора, составляющем 1,8 %, и меди – 18 %, стойкость исследуемого материала находилась на уровне антифрикционных бронз типа БрАЖ 9-4. Введение в состав оболочки каждой частицы бора в количестве более 2 % ведет к образованию большого количества износостойких боридов высокой твердости, располагающихся по периферии фаз α -Fe. В этом случае взаимодействуют с материалом вала только фазы с высокой твердостью, что негативно влияет на антифрикционные свойства покрытия, увеличивая интенсивность изнашивания вала.

При наличии бора 1...1,5 % отсутствует сплошной диффузионный слой и общее количество боридных включений в нанесенном покрытии является недостаточным для повышения антифрикционности. Кроме того, недостаток бора в диффузионной оболочке ухудшает качество получаемого покрытия. Это приводит к выкрашиванию фрагментов покрытия, катастрофическому изнашиванию как вала, так и вкладыша.

Образование легкоплавких боридных эвтектик при введении бора в количестве 1,5...2 % способствует улучшению сцепления покрытия с металлом основы. Позволяет получать мелкопористое покрытие, где фазы с высокой твердостью заключены в не сплошной оболочке из менее твердых фаз, а относительно твердая основа из крупно- и среднедисперсных фаз α -Fe разделена каркасом, состоящим из эвтектидных фаз с сеткой бороцементита.

При присутствии в исходном материале покрытия трущегося соединения до 5 % меди, она оказывает минимальное воздействие на свойства трибосопряжения. Интенсивность изнашивания в этом случае максимальна, что можно объяснить недостаточным содержанием меди и незначительным повышением теплопроводности материала покрытия. Если на начальном этапе очаги меди и присутствуют в материале, исполняя роль антифрикционных добавок, то к концу приработки соединения наблюдается скачкообразный рост износа, что может свидетельствовать об отсутствии медной составляющей.

При содержании меди в порошковой шихте более 20 % твердость полученного покрытия составляет HRC 20...22. В процессе триботехнического взаимодействия возникают локальные очаги схватывания и микрофрагментарного вырыва, чему способствует локализация крупно- и среднедисперсных фаз меди в обрамлении твердофазной основы материала покрытия, что ведет к интенсивному износу пары трения на этапе установившегося износа.

При содержании меди 10...15 % твердость покрытия составила HRC 25...27. Улучшению триботехнических характеристик покрытия способствует тот факт, что мелкодисперсные фазы меди относительно равномерно расположены в объеме покрытия и тем самым создают возможность локального массопереноса на участки с повышенной твердостью. На начальных этапах наблюдалось значительное снижение интенсивности изнашивания трущегося соединения. Однако затем происходит ее скачкообразный рост. Это может свидетельствовать о перераспределении меди в начале процесса, затем о концентрации ее в отдельных местах поверхности. Это сказывается, во-первых, на равномерности износа и, во-вторых, в местах наибольшей концентрации меди наблюдаются микровыворывы поверхности вкладыша, произошедшие вследствие возникновения локальных мостиков сварки [15]. Все вышеперечисленное ведет к росту температуры и увеличению износа трущегося соединения.

При наличии меди в количестве до 10 % предполагается возрастание теплопроводности материала и снижение интенсивности изнашивания. В начальный период работы соединения мы наблюдали резкий скачок интенсивности изнашивания, что объясняется перераспределением меди по поверхности трения и ее участием в трении как антифрикционного материала. В этом случае интенсивность изнашивания пары трения наименьшая.

Таким образом, минимальная интенсивность изнашивания как всего соединения, так и его деталей наблюдается при содержании меди, близком к 10 %. При содержании меди в составе порошкового материала 15 % и более интенсивность изнашивания пары трения увеличивается, что можно объяснить тем,

что в процессе триботехнического взаимодействия возникают локальные очаги схватывания и микрофрагментарного вырыва как в покрытии, так и в материале сопряженной детали. Содержание меди менее 5 % влияния на свойства покрытия практически не оказывает, и интенсивность изнашивания трибопары в данном случае максимальна.

При сопоставительном анализе рассматриваемых материалов на износостойкость и усталостную прочность (рис. 5) было выявлено, что образцы с покрытиями из стали У7 с добавлением бора и меди при высокой износостойкости имеют низкую усталостную прочность. Это может быть объяснено наличием большого количества карбидных и боридных высокотвердых составляющих, равномерно распределенных по объему покрытия, что вызывает высокие остаточные напряжения и повышенную хрупкость.

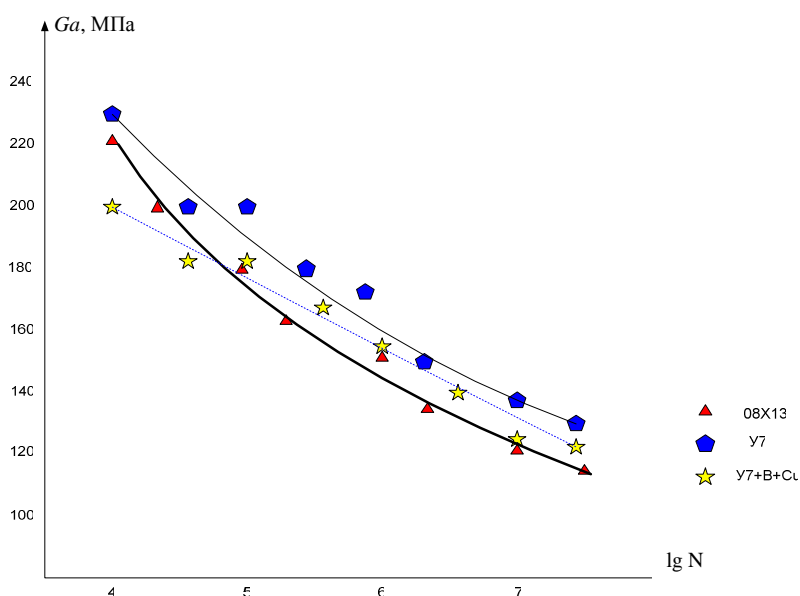


Рис. 5. Кривые усталости образцов с наплавленными покрытиями

Заключение. Исследованы морфология, структура и свойства диффузионно-легированных стружечных отходов. Установлено, что прилипание медных частиц к поверхности стружки в условиях герметизированного вращающегося контейнера наиболее интенсивно происходит при наличии диффузионной боридной оболочки. Это обусловлено следующими факторами: низкой растворимостью меди в феррите при температуре 960...980 °С и минимальной растворимостью при 20 °С; восстановительным действием бора в оболочке исходной частицы. В результате медная пусыера, находящаяся в насыщающей смеси при температуре 960...980 °С припекается к боридной оболочке частицы. Отмечено, что боридная оболочка в данных условиях практически полностью диффузионно непроницаема для меди, поэтому растворения меди в чугунной стружке не происходит, что обеспечивает наличие медных включений в нанесенном материале.

Исследованы технологические параметры процесса плазменного формообразования композиционного материала. Установлено, что, наилучшими режимами нанесения для достижения максимальной прочности сцепления диффузионно-легированной стружки с основой являются: для насыщенной бором и медью стружки низкоуглеродистой стали сила тока 180...220 А, дистанция напыления 95...105 мм; для насыщенной бором и медью стружки высокоуглеродистой стали сила тока 220...280 А, дистанция напыления 95...105 мм. Это обусловлено различиями в теплофизических свойствах, химическом составе и форме стружечных частиц отходов.

Исследована микроструктура композиционного материала из диффузионно легированной стружки, полученных плазменным формообразованием. Экспериментально установлена возможность регулирования свойств нанесенного материала, количеством диффузионно введенных меди и бора а также технологическими режимами плазменного формообразования. Определены основные параметры, оказывающие влияние на свойства материала: содержание легирующих элементов; сила тока; толщина слоя нанесения.

Установлено, что при повышении силы тока при напылении до 260 А возрастает количество карбидов (боридов), имеющих повышенную твердость. Снижая силу тока, можно регулировать количество образования вторичных фаз высокой твердости, что тем самым подтверждает возможность создания структуры материала, способной быть работоспособной при различных условиях эксплуатации.

На основе экспериментальных данных установлены следующие эффекты: при малой силе тока ($I = 150$ А) материал на основе металлоотходов приобретает антифрикционные свойства, так как нет переплава материала, количество эвтектики незначительно, высокотвердых вторичных фаз – минимум. И на-

оборот, при повышении мощности ($I = 300$ А) материал на основе металлоотходов приобретает свойства износостойкости, что объясняется заэвтектической структурой с наличием мелкодисперсных фаз и вторичных карбидов (боридов), имеющих повышенную твердость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов, С.Н. Концептуальные аспекты многокритериального подхода при разработке износостойких сплавов / С.Н. Попов [Электронный ресурс] / Запорожский нац. техн. ун-г. – Режим доступа: www.otzv.hl.ru.
2. Козловский, И.Л. Разработка порошковых борсодержащих антифрикционных материалов на основе железа для тяжело нагруженных узлов трения: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.16.06 / И.Л. Козловский; Белорус. республ. НПО порошковой металлургии. – Минск, 1988. – 18 с.
3. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
4. Медь в черных металлах / под ред. И. Ле Мэя и Л.М.-Д. Шетки; пер. с англ. под ред. О.А. Банных. – М.: Металлургия, 1988. – 312 с.
5. Способ получения композиционного материала на основе меди для деталей волноводов: заявка 59-153850 Японии: Кл. С 22С1/04; С22 С1/10.
6. Фадин, В.В. Износостойкость композиционного материала на медной основе с железосодержащими наполнителями / В.В. Фадин, М.И. Алеутова, С.А. Беляев // Физика прочности и пластичности материалов: тез. докл. 15 междунар. конф., Тольятти, 30 сент. – 3 окт. 2003 г. – Тольятти: ТолГУ, 2003. – С. 3.
7. Кутьков, А.А. Износостойкие и антифрикционные покрытия / А.А. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
8. Кубашевски, О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: справ. изд. / О. Кубашевски; пер с англ. – М.: Металлургия, 1988. – 184 с.
9. Воловик, Е.Л. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л. Воловик. – М.: Колос, 1981. – 352 с.
10. Лабунец, В.Ф. Износостойкие боридные покрытия / В.Ф. Лабунец, И.В. Киндарчук, Л.Г. Ворошнин. – Киев: Тэхника, 1989. – 158 с.
11. Спиридонова, И.М. Структура и свойства железоборуглеродистых сплавов / И.М. Спиридонова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 2. – С. 12–16.
12. Пантелеенко, Ф.И. Теоретические и технологические основы получения самофлюсующихся порошков на железной основе диффузионным легированием и разработка износостойких композиционных покрытий из них: дис. ... д-ра техн. наук / Ф.И. Пантелеенко. – Минск, 1992. – 245 с.
13. Григорович, В.К. Твердость и микротвердость металлов / В.К. Григорович. – М.: Наука, 1978. – 230 с.
14. Швец, Т.М., Кушевская Н.О., Перекоз А.Е. Фазовый состав и структура высокодисперстных порошков железа и его композиций с платиной, серебром, золотом, медью и цинком / Т.М. Швец, Н.О. Кушевская, А.Е. Перекоз // Порошковая металлургия. – 2003. – № 1–2. – С. 28–35.
15. Баланин, В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения / В.А. Баланин. – М.: Машиностроение, 1980. – 136 с.

Поступила 05.01.2015

DESIGNING OF COMPOSITE MATERIAL ON THE BASIS OF METALWASTE

T. VIGERINA, O. SHTEMPEL, V. FRUCKI

The antifrictional materials working at high speeds of sliding and big pressure are considered. The reasons of high wear resistance of antifrictional materials in such conditions are analysed. The technology of putting the wearproof composite material received from metalwaste with the subsequent economical alloying of initial material in the mobile spent mixes is developed. Possibility of receiving antifrictional material, with structure similar to structures of Sharpi of the I type which isn't conceding on wear resistance to antifrictional bronzes is shown. The chemical composition, structure and properties of the composite material applied on a working surface can be varied in the wide range, selecting optimum parameters for specific conditions. Expediency of use in repair production of the enterprises of technology of receiving composite material on the basis of metalwaste with application of a thermal diffusion alloying is proved.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 665.775.625.85

ПЕРЕРАБОТКА КИСЛОГО ГУДРОНА ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФОНАТНЫХ ПРИСАДОК В БИТУМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ МЕТОДОМ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ

*канд. хим. наук, доц. С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ; канд. техн. наук Ю.А. БУЛАВКА;
канд. техн. наук, доц. А.П. ШВЕДОВ; М.Г. НЕСТЕРОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)*

Анализируется состояние проблемы утилизации кислых гудронов. Исходя из результатов проведенного анализа предложена доступная для реализации технология переработки кислого гудрона производства сульфонатных присадок СООО «ЛЛК-Нафтан» в битумные материалы методом его термоокисления и последующего компаундирования с остаточным гудроном. Предлагаемый способ позволяет получить дорожный битум, соответствующий требованиям СТБ 1062-97 и СТБ EN 12591-2010, а рекомендуемая технология – расширить базу сырьевых ресурсов для получения битумных материалов за счет использования отхода производства сульфонатных присадок, удешевить процесс получения дорожного битума.

Введение. Проблемы экологической безопасности и современных методов утилизации отходов производства в условиях устойчивого промышленного роста приобретают все большее значение. Особенно остро стоят эти вопросы на предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической отрасли.

Отходы нефтехимических производств – кислые гудроны – образуются при сернокислотной очистке минеральных масел, получении сульфонатных присадок, в процессах алкилирования с использованием серной кислоты в качестве катализатора и др. [1]. Данный вид отходов представляет серьезную экологическую проблему. Являясь отходом 2-го класса опасности (код отхода 5480601 согласно Постановлению Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 08.11.2007 № 85 «Об утверждении классификатора отходов, образующихся в Республике Беларусь»), кислый гудрон накапливается в отвалах и открытых прудах-накопителях, где с течением времени происходит вымывание кислоты атмосферными осадками и выделение SO_2 и SO_3 , в результате чего загрязняются водный и воздушный бассейны. В списке нефтеотходов кислые гудроны по объему занимают второе место и относятся к наиболее трудно утилизируемым отходам.

Однако кислый гудрон является ценным вторичным материальным ресурсом для получения некоторых продуктов, в том числе товарных нефтепродуктов. Постоянная потребность в таких товарных нефтепродуктах, как дорожный битум, кровельные мастики и другие с относительно высокой себестоимостью, обуславливают необходимость поиска новых путей их получения, в том числе с использованием менее дорогостоящих компонентов сырья, в частности кислых гудронов, что определяет актуальность исследований в данном направлении.

Анализ патентных исследований по проблеме получения битумов или битумных композиций из кислого гудрона показал, что, несмотря на широкий спектр известных решений промышленного и полупромышленного уровня без добавок каких-либо компонентов, из кислого гудрона не удалось получить продукта, удовлетворяющего требованиям на битумные материалы. Способы переработки кислых гудронов с получением битумных материалов в качестве обязательных стадий, как правило, включают их нейтрализацию реагентом с последующим разделением эмульсии, выделение нейтрлизованного продукта и термоокисление продуктов нейтрализации. Например, предложены такие методы:

- переработка кислых гудронов с получением вязущего путем их нейтрализации водным щелочным раствором с последующим нагревом нейтрлизованного продукта до 160...180 °С в течение 4...5 ч [3]. Однако полученный битумный материал имеет невысокие вязущие свойства, например растяжимость при 25 °С составляет 17,5 см. Данный способ утилизации характеризуется длительностью, высокими энергозатратами на процесс и высоким содержанием воды в получаемом продукте;

- получение битума дорожного и строительного путем совместной переработки кислого гудрона (с кислотным числом 12...30 мг КОН/г гудрона) и прямогонного гудрона (10 % кислого гудрона и 90 % прямогонного гудрона) [4], но вследствие более низкого, чем из прямогонного гудрона, качества и повышения себестоимости получаемого битума этот способ не находит широкого применения;

- переработка кислых гудронов производства сульфонатных присадок путем нейтрализации водными растворами щелочей с получением нейтрального продукта [5]. Существенный недостаток метода заключается в том, что образуются два слоя и только отделяемый верхний слой используют для получения дорожного битума;

- переработка кислого гудрона путем нейтрализации щелочью и последующим термоокислением продуктов нейтрализации в присутствии модифицирующей добавки – элементарной серы – в количестве 5...10 % на 100 % окисляемого сырья с получением битумных вяжущих на основе кислого гудрона с характеристиками строительного битума [6]. Однако полученный материал имеет низкие значения растяжимости – около 12 см при 25 °С;

- получение битума путем смешения кислых отходов нефтепереработки с нагретыми высококипящими нефтепродуктами с получением реакционной массы и газобитумной пены с последующим ее разрушением [7]. Данный способ не нашел применения из-за сложного и дорогостоящего аппаратного оформления;

- получение битумного вяжущего путем нейтрализации кислого гудрона, осушки и окисления при повышенной температуре продуктов нейтрализации и дополнительного окисления воздухом полученных продуктов окисления в присутствии 40...60 масс. % асфальта деасфальтизации нефтяных масел пропаном при 140...160 °С в течение 20...60 мин при расходе воздуха 0,5...0,8 л/мин·кг [8]. Недостатки этого способа заключаются в частичной утилизации кислого гудрона (только его верхнего органического слоя), длительности и затратах на осуществление процесса нейтрализации.

Во всех рассмотренных способах переработки кислого гудрона с получением битумных материалов используется нейтрализующий агент и (или) процесс окисления углеводородного сырья кислородом воздуха. Следует отметить, что процессу нейтрализации свойственно образование большого количества сточных вод. Кроме того, получение битумных материалов данными способами предусматривает наличие четырех стадий: термообработку, выпаривание воды, нейтрализацию и окисление, которые требуют наличия нескольких аппаратов, что ведет к удорожанию процесса производства битума.

Цель данного исследования – расширение ассортимента битумных материалов за счет более полного использования кислого гудрона, побочного продукта производства сульфонатных присадок, снижение трудоемкости и стоимости процесса за счет исключения стадии нейтрализации.

Методы исследований. Поставленная цель решалась путем медленного нагрева и термообработки при 160 °С при атмосферном давлении в течение 40 минут с постоянным перемешиванием и отводом парогазовой среды масляного кислого гудрона производства сульфонатных присадок СООО «ЛЛК-Нафтан», содержащего в составе органическую массу (смолисто-масляные вещества 40...60 % масс.; смолисто-асфальтеновые 5...10 % масс.; сульфокислоты в пересчете на SO₃H – 15...25 % масс.; серную кислоту – 2...4 % масс.; воду – 1,5...2 % масс.). Снижение кислотного числа с 6 до 1 мг КОН/г. Полученный продукт смешивали и прогревали при 140 °С в течение 40 минут с утяжеленным гудроном (остаточным битумом) с условной вязкостью при 80 °С не менее 25, полученным глубоким отгоном масляных фракций на установке ВТ-1 ОАО «Нафтан», в соотношении:

- для первого образца: 10 % масс. кислого гудрона и 90 % масс. прямогонного гудрона (при этом кислотное число смеси снижается до 0,02 мг NaOH/г);

- для второго образца: 15 % масс. кислого гудрона и 85 % масс. прямогонного гудрона (кислотное число смеси снижается до 0,04 мг NaOH/г).

Для полученных образцов определяли:

- глубину проникания иглы (пенетрацию) в соответствии с требованиями ГОСТ 11501-78 [9];

- температуру размягчения по методу КиШ в соответствии с ГОСТ 11506-73 [10];

- растяжимость (дуктильность) по ГОСТ 11505-75;

- температуру хрупкости по Фраасу по ГОСТ 11507-78;

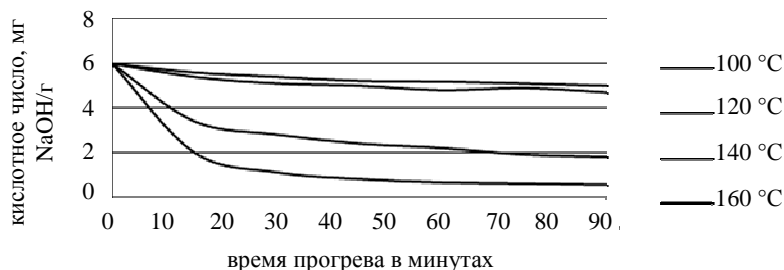
- температуру вспышки в открытом тигле по ГОСТ 4333-87;

- индекс пенетрации расчетным путем по методике, приведенной в [11].

Результаты и их обсуждение. Кислые гудроны представляют собой густую, вязкую массу с резким кислотным запахом, обусловленным наличием в их составе сернистых соединений, отличающихся высокой коррозионной агрессивностью по отношению к металлам. При термообработке кислого гудрона производства сульфонатных присадок происходит низкотемпературное разложение, заключающееся во взаимодействии серной кислоты со смолисто-масляными и смолисто-асфальтеновыми веществами органической части кислого гудрона, которые выступают в роли органических восстановителей. Вследствие реакций дегидрирования и конденсации увеличивается содержание смол и асфальтенов. Вероятная схема процесса может быть представлена следующим образом:



По сравнению с исходным кислым гудроном снижается концентрация окисляющего агента, что установлено по уменьшению значения кислотного числа кислого гудрона (рисунок), при этом образуется гомогенная нерасплаивающаяся битумная масса, которая, по нашему мнению, может применяться в качестве вяжущего для получения битумных материалов.



Зависимость кислотного числа кислого гудрона от времени и температуры прогрева

Летучие продукты, содержащие сернистый газ, могут поглощаться в абсорбере аммиачной водой или раствором кальцинированного натрия. Установлено, что увеличение времени выдержки более 40 минут экономически нецелесообразно, так как кислотное число значительно не меняется. Увеличение температуры прогрева кислого гудрона свыше 160 °C приводит к росту температуры размягчения исходного материала до 70 °C и выше, снижению глубины проникания иглы до 20×0,1 мм (при 25 °C). Это, вероятно, обусловлено образованием в реакционной массе нерастворимых соединений – карбенов и карбоидов, что может стать причиной закоксовывания оборудования.

Показатели качества полученных образцов битумных материалов и приоритетные свойства вязких дорожных битумов марки БД 40/60 (производимых в соответствии в СТБ 1062-97), 35/50, 40/60 и 50/70 (производимых в соответствии в СТБ EN 12591-2010) представлены в таблице 1.

Технические требования к нефтяным битумам, характеристика образцов

Наименование показателя	Образец 1	Образец 2	СТБ 1062-97	СТБ EN 12591-2010		
			БД40/60	35/50	40/60	50/70
Глубина проникания иглы (пенетрация), 0,1 мм при 25 °C	55	47	40...60	35...50	40...60	50...70
Температура размягчения по кольцу и шару °C	51	55	не ниже 51	50...58	45...56	46...54
Температура хрупкости по Фраасу °C	-23	-17	не выше -12	не выше -5	не выше -7	не выше -8
Растяжимость (дуктильность), см, при 25 °C	100	85,6	не менее 45	не нормируется		
Индекс пенетрации	-0,74	-0,17	от -1,0 до +1,0	от -1,5 до +0,7		
Температура вспышки °C, не ниже	240			230		

Из таблицы видно, что показатели качества образца 1 битумного материала соответствуют характеристикам вязких дорожных битумов марки БД 40/60 (СТБ 1062-97), 40/60 и 50/70 (СТБ EN 12591-2010), а образца 2 битумного материала соответствуют показателям вязких дорожных битумов марки БД 40/60 (СТБ 1062-97), 35/50 и 40/60 (СТБ EN 12591-2010).

Исследование стабильности при продолжительном хранении при повышенных температурах по ГОСТ 18180-72 полученных образцов 1 и 2 битумных материалов показали, что после прогрева (+163 °C / 300 мин) абсолютное значение изменения массы образцов составило не более 0,006 % масс., а остаточная пенетрация и увеличение температуры размягчения соответствовали требованиям на битумы 35/50, 40/60 и 50/70 по СТБ EN 12591-2010 и БД40/60 по СТБ 1062-97.

Таким образом, исходя из проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- компаундирование 10...15 % масс. добавки подвергнутого низкотемпературному нагреву кислого гудрона производства сульфатных присадок СООО «ЛЛК-Нафтан» с остаточным гудроном позволяет получить дорожный битум, соответствующий требованиям СТБ 1062-97 и СТБ EN 12591-2010;

- предложенный способ переработки кислого гудрона производства сульфонатных присадок в битумные материалы дает возможность расширить сырьевые ресурсы за счет использования отхода производства, снизить нагрузку на окружающую среду и снизить затраты, необходимые для процесса получения дорожного битума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ вяжущих битумных материалов, полученных из кислых гудронов, на соответствие требованиям ГОСТа / М.В. Хмелева [и др.] // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – № 4(1). – С. 93–97.
2. Колмаков, Г.А. Экологические и физико-химические аспекты процессов термической переработки кислых гудронов в дорожный битум: дис. ... канд. хим. наук: 03.00.16, 02.00.03 / Г.А. Колмаков; Нижегород. гос. ун-т им. Н.И. Лобачевского. – Нижний Новгород, 2007. – 121 л.
3. Авторское свидетельство № 617937 СССР, МПК С10С3/04; опубл. 15.01.1979.
4. Авторское свидетельство № 165975 СССР, МПК С10С3/04; опубл. 1964.
5. Пархоменко, В.Е. Кислый гудрон как технологическое сырье / В.Е. Пархоменко. – М.: Гостоптехиздат, 1947.
6. Патент RU 2289605, МПК С10G17/10, С10С3/04; опубл. 20.12.2006.
7. Авторское свидетельство СССР № 973589, МПК С10С3/04; опубл. 15.11.1982.
8. Авторское свидетельство СССР № 810753, МПК С10С3/04; опубл. 07.03.1981.
9. Битумы нефтяные. Метод определения глубины проникания иглы: ГОСТ 11501-78. – М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.
10. Битумы нефтяные. Метод определения температуры размягчения по кольцу и шару: ГОСТ 11506-73. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 7 с.
11. Гун, Р.Б. Нефтяные битумы / Р.Б. Гун. – М.: Химия, 1973. – 432 с.

Поступила 29.01.2015

THE TECHNOLOGY OF RECYCLING ACID TAR OF PRODUCTION OF SULFONATE ADDITIVES INTO BITUMINOUS MATERIALS BY THERMOOXIDATION METHOD

S. JAKUBOWSKI, Y. BULAUKA, A. SHVEDOV, M. NESTEROVICH

The article has analyzed the problem of disposing of acid tars and has offered technology of acid sludge production sulfonate additives JV "LLK-Naftan" in bituminous materials by thermal oxidation and its subsequent kompaundiraniya with a residual tar. The method allows to get road bitumen complies with the requirements of STB 1062-97 and STB EN 12591-2010 are proposed. The proposed technology will expand the base of raw material resources for bituminous materials by the use of waste production, reduce the cost of the process of obtaining road bitumen.

УДК 663.551.41

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАПАННОЙ ТАРЕЛКИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

канд. техн. наук, доц. В.Б. ХАЛИЛ; Д.Н. МАЙТАМ
(Полоцкий государственный университет)

Демонстрируется новая конструкция клапанной тарелки. Приведены результаты экспериментальных исследований в виде графических зависимостей эффективности разработанной тарелки от скорости газа в колонне. Показано, что при относительно невысоком гидравлическом сопротивлении эффективность усовершенствованной клапанной тарелки при десорбции углекислого газа составляет 95...97 %.

Введение. Основным видом технологического оборудования, используемого на предприятиях отраслей химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, являются колонные аппараты, оборудованные контактными массообменными устройствами различных типов и конструкций и предназначенные для осуществления конкретных технологических процессов, связанных с переносом компонентов перерабатываемых потоков между фазами, контактирующими в ходе реализуемого процесса (ректификация, абсорбция, десорбция и т.п.). Для процесса абсорбции среди различных типов колонных аппаратов наиболее распространены насадочные и тарельчатые абсорберы.

В промышленности часто используются колонные аппараты, оборудованные разнообразными контактными массообменными устройствами. Такое разнообразие конструкций закономерно, так как невозможно существование универсальных аппаратов, удовлетворяющих всем требованиям практического использования массообменных аппаратов в широком спектре технологических процессов. Цель данной работы состояла в разработке клапанной тарелки, исследовании её функционирования, а также в сравнении эффективности массопередачи.

Основная часть. Для повышения эффективности проведения массообменных процессов нами разработана новая конструкция клапанной тарелки (рис. 1), отличительной особенностью которой является наличие перфорированных колпачков 2 (рис. 1, б), которые крепятся к тарелке болтами, и саморегулирующихся дисковых клапанов 3 (рис. 1, в), способных подниматься при движении пара (газа).

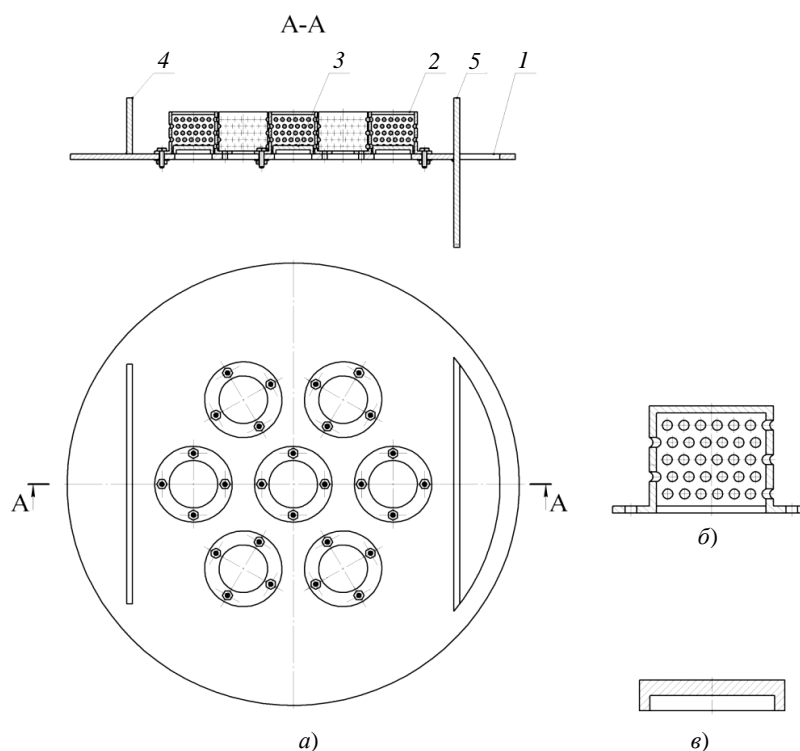


Рис. 1. Конструкция разработанной клапанной тарелки:
а – клапанная тарелка в сборе; б – колпачок; в – клапан;
1 – тарелка; 2 – колпачок; 3 – клапан; 4 – приемный порог; 5 – перегородка

Принцип работы тарелки следующий. Свободно лежащий над отверстием в тарелке клапан с изменением расхода газа своим весом автоматически регулирует величину площади зазора между клапаном и плоскостью тарелки для прохода газа и тем самым поддерживает постоянной скорость газа при его истечении в барботажный слой. При этом с увеличением скорости газа в колонне гидравлическое сопротивление клапанной тарелки увеличивается незначительно. Высота подъема клапана ограничивается высотой колпачка. Жидкость поступает по трубке сверху на тарелку, переливается через приемный порог 4. Снизу поднимается газ, проходя через прорези в колпачках, попадает в жидкость и барботирует через неё в виде пузырьков. При увеличении столба жидкости над тарелкой она переливается через перегородку 5 и стекает вниз, откуда удаляется из колонны.

Экспериментальные исследования разработанной клапанной тарелки проводились на испарение воды с поверхности тарелки (основное сопротивление массопереносу сосредоточено в газовой фазе). Цель исследований состояла в определении эффективности усовершенствованной клапанной тарелки.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.

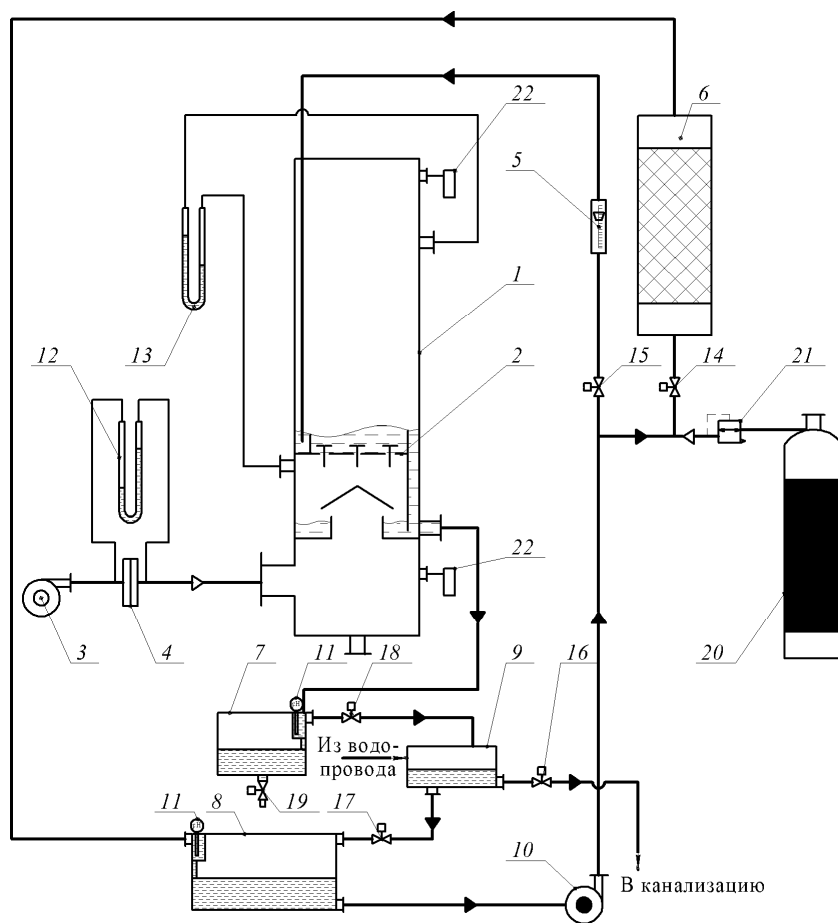


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 – массообменная колонна; 2 – клапанная тарелка; 3 – вентилятор; 4 – диафрагма; 5 – ротаметр;
 6 – колонна насыщения; 7 – емкость для сбора отработанной жидкости; 8 – питающий резервуар;
 9 – переливной бак; 10 – насос; 11 – рН-метры; 12, 13 – дифманометры; 14–19 – вентили;
 20 – баллон с углекислым газом; 21 – редукционный вентиль; 22 – термогигрометры

Установка работает следующим образом. Воздух вентилятором 3 нагнетается в нижнюю часть колонны 1. Расход воздуха определялся с помощью диафрагмы 4 и дифманометра 12, а величина гидравлического сопротивления тарелки – дифманометра 13. В переливной бак 9 из сетевого водопровода подается необходимое количество воды. При исследовании испарения с поверхности тарелки жидкость из переливного бака самотеком подается в питающий резервуар, откуда насосом подается в массообменную колонну, где и происходило ее испарение с поверхности тарелки. Влажность воздуха на входе в колонну и на выходе из нее измерялась термогигрометрами 22, установленными в нижней царге и верхней части колонны.

Фиктивная (приведенная) скорость воздуха в колонне w , м/с, то есть отнесенная к полному сечению колонны, определялась следующим образом [1]:

$$w = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2}, \quad (1)$$

где V – объемный расход воздуха в колонне, определяемый с помощью диафрагмы и дифманометра, м³/с; d – внутренний диаметр колонны, равный 0,144 м.

Гидравлическое сопротивление тарелки определялось по разности статических давлений под тарелкой и над ней.

Плотность орошения в колонне q , м³/(м²·ч) находили из уравнения расхода:

$$q = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

где Q – объемный расход жидкости в колонне, измеряемый с помощью ротаметра, м³/ч.

Эффективность массопередачи определялась за счет изменения рН жидкости и влажности воздуха на входе в колонну и на выходе из нее.

При проведении экспериментальных исследований десорбции СО₂ из воды эффективность клапанной тарелки по уравнению [3] составила

$$E = \frac{C_n - C_k}{C_n} = 1 - 10^{-(\text{pH}_k - \text{pH}_n)}, \quad (3)$$

где C_n и C_k – концентрации СО₂ в воде соответственно на входе в колонну и на выходе из нее, кг/м³; pH_n и pH_k – рН жидкости на входе в колонну и на выходе из нее.

Содержание СО₂ определялось по изменению кислотности среды стандартным прибором рН-метром. На основании обработки экспериментальных данных в работе [3] была получена зависимость для определения концентрации СО₂ в воде от кислотности раствора, которая в диапазоне рН 5...7 рассчитывается по формуле

$$C = 2,69 \cdot 10^{5-\text{pH}}. \quad (4)$$

Результаты экспериментальных исследований эффективности разработанной тарелки при десорбции СО₂ из воды представлены на рисунках 3–6.

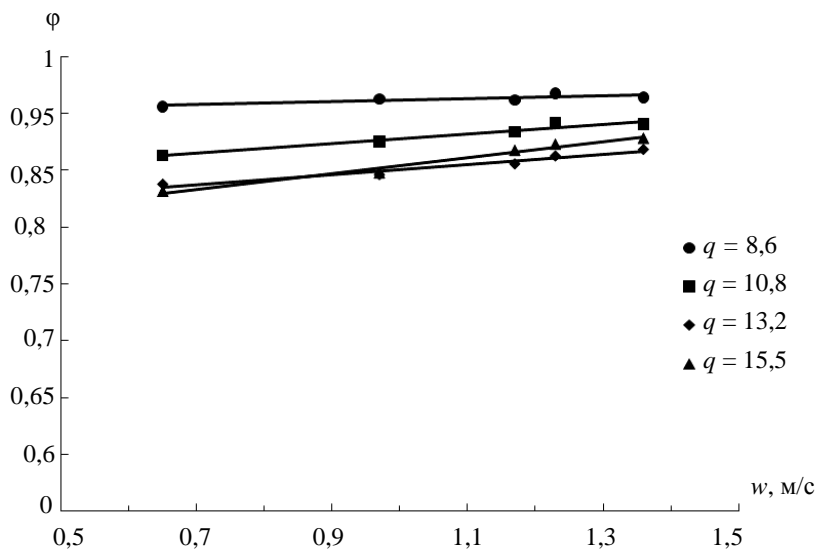


Рис. 3. Эффективность разработанной клапанной тарелки при десорбции СО₂ при различных плотностях орошения q , м³/(м²·ч); короткий клапан, диаметр отверстий 2 мм

Исследования проводились с двумя типами колпачка: с высоким подъемом клапана – до 27 мм; низким подъемом клапана – до 21 мм.

Кроме этого перфорация колпачка была выполнена в двух вариантах: 2 и 3 мм.

Диапазон устойчивой работы усовершенствованной клапанной тарелки наблюдается при скорости воздуха 0,6...1,7 м/с. При этом на тарелке возникает газожидкостная дисперсная система – пена, что соответствует пенному режиму работы тарелки. В указанном режиме контактирование газа и жидкости происходит на поверхности пузырьков и струй газа, а также на поверхности капель жидкости, которые в большом количестве образуются над барботажным слоем при выходе пузырьков газа из барботажного слоя и разрушении их оболочек. В пенном режиме поверхность контакта фаз на тарелке максимальна.

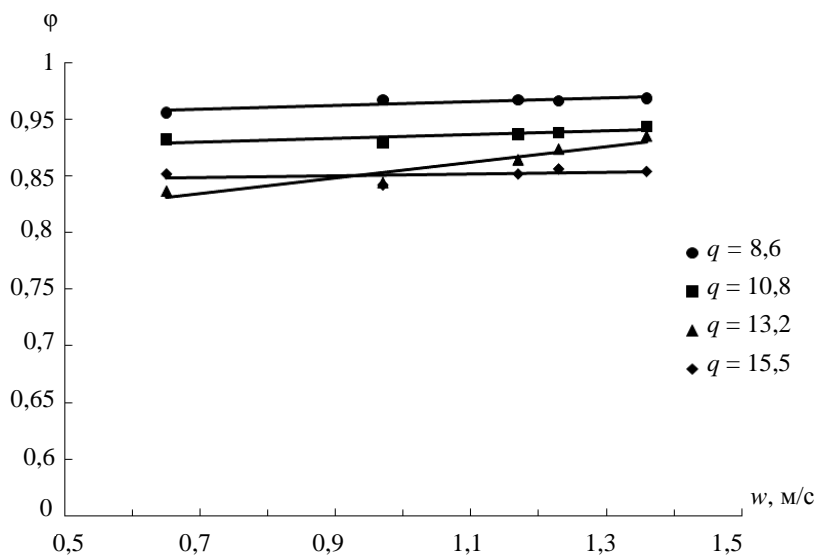


Рис. 4. Эффективность разработанной клапанной тарелки при десорбции CO_2 при различных плотностях орошения $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$; длинный клапан, диаметр отверстий 2 мм

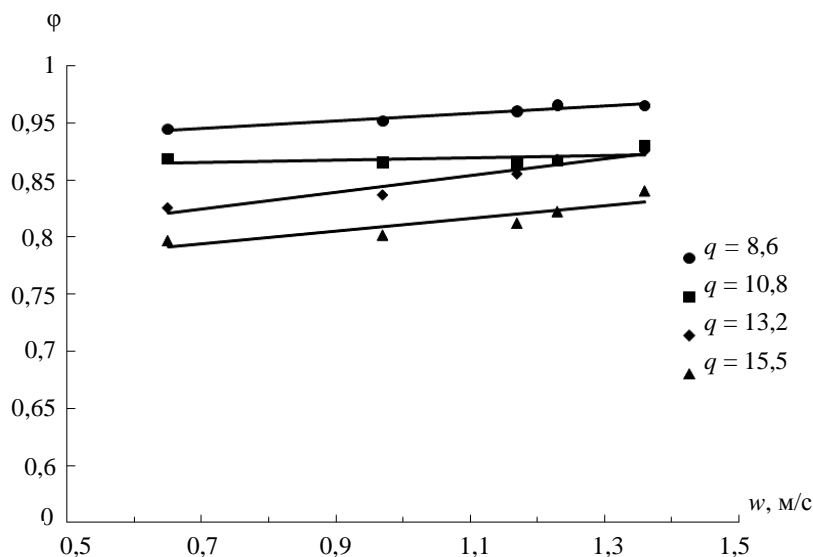


Рис. 5. Эффективность разработанной клапанной тарелки при десорбции CO_2 при различных плотностях орошения $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$; короткий клапан, диаметр отверстий 3 мм

Эффективность разработанной клапанной тарелки практически не зависит от скорости газа и изменяется в пределах 95...97 % при десорбции CO_2 , в то время как эффективность стандартной клапанной тарелки не превышает 88 % [4, с. 290, рис. III-43].

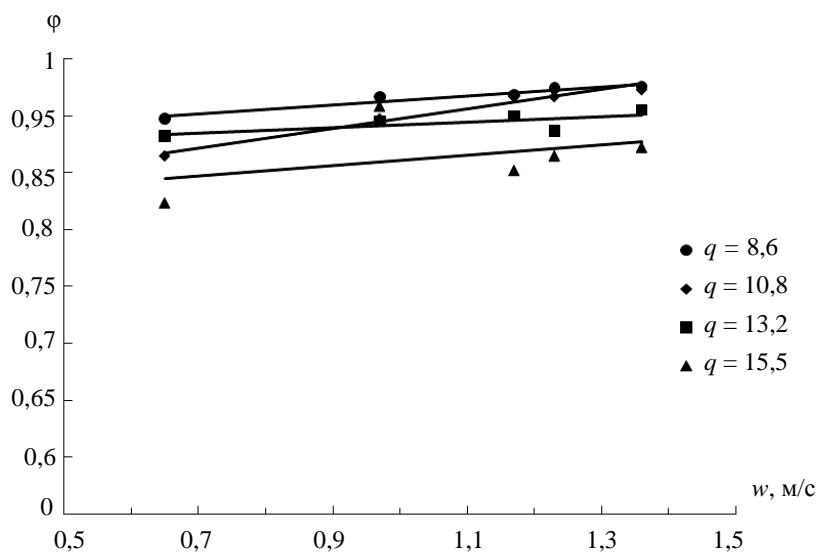


Рис. 6. Эффективность разработанной клапанной тарелки при десорбции CO_2 при различных плотностях орошения q , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \text{ч})$; длинный клапан, диаметр отверстий 3 мм

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1) эффективность разработанной клапанной тарелки практически не зависит от скорости газа и при десорбции CO_2 составляет 95...97 %. Высокая эффективность разработанной тарелки объясняется повышенным диспергированием газовой фазы с помощью перфорированных колпачков, что приводит к увеличению поверхности контакта фаз, а следовательно и к эффективности массопередачи;

2) разработанная тарелка имеет высокую эффективность, что позволяет широко использовать данный тип тарелок для проведения массообменных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов / А.Г. Касаткин. – 11-е изд., стереотип., дораб. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2005. – 753 с.
2. Владимиров, А.И. Основные процессы и аппараты нефтегазопереработки: учеб. пособие для вузов / А.И. Владимиров, В.А. Щелкунов, С.А. Круглов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 227 с.
3. Вайтехович, П.Е. Разработка и исследование вихревых массообменных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / П.Е. Вайтехович. – Минск, 1982. – 211 с.
4. Судаков, Е.Н. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки / Е.Н. Судаков. – М.: Химия, 1979. – 569 с.

Поступила 30.01.2015

RESEARCH OF PROCESS OF THE DESORPTION OF CARBON DIOXIDE WITH USE OF THE VALVATE PLATE OF THE NEW DESIGN

W. KHALIL, D. MAITHAM

In the article the new design of valve collar is presented. The results of experimental researches in the form of graphic dependences of efficiency of the developed plate on gas speed in a column are resulted. The efficiency of improved valve collar at rather low hydraulic resistance is 95...97 %.

УДК 66.0:004.04

**ПОДДЕРЖКА УПРАВЛЕНИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

*канд. техн. наук А.В. СПИРИДОНОВ; канд. хим. наук С.Ф. ЯКУБОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет);
д-р хим. наук М.А. ЗИЛЬБЕРГЛЕЙТ
(Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси, Минск)*

Рассмотрена возможность управления химико-технологическим процессом методами активного эксперимента. Для управления реальным технологическим процессом предлагается использовать методы распознавания образов в виде нелинейного и кусочно-линейного решающего правил. Приведен пример применения такого подхода для разделения сложных классов, которые не удается разделить при помощи линейной дискриминантной функции.

Введение. Анализируя поток информации, связанный с управлением технологическими процессами, следует признать, что методы активного эксперимента вне лабораторных исследований не привели и, очевидно, не могут привести к получению положительного результата. С одной стороны, это связано с невозможностью поддержания исследуемых параметров на постоянном уровне, а с другой – с трудностями производства провести эксперимент в промышленном масштабе. Потери в случае неудачи такого активного эксперимента могут быть несопоставимы с будущим результатом.

Существует целый ряд производственных процессов, особенностью которых является использование исходного химического сырья с переменным составом. В первую очередь речь идет о природном химическом сырье, состав которого непрерывно изменяется и не поддается прогнозу. Так, на Лебединском и Михайловских карьерах содержание железа в рудном массиве колеблется от 45 до 67 %, на расстоянии 6...8 метров по фронту содержание железа изменяется на 5 и более процентов. Изменчивость руд цветных металлов наблюдается в еще большей степени [1]. На производстве единственным в настоящее время используемым способом для управления составом является усреднение. Поэтому, например, в условиях переработки природного сырья необходимы большие площади под соответствующие помещения, а также определенные ресурсы – электроэнергия, заработная плата персонала и т.п.

Основная часть. Функции существующих автоматизированных систем управления технологическим процессом заключаются в стабилизации параметров первичных технологических контуров. Решение о настройке должен принять технологический персонал. Достаточно давно известным решением о поддержке технологического процесса при неопределенности изменения входных параметров является применение симплексного метода управления [2], однако данный метод широкого применения не нашел, очевидно, вследствие заикливания процесса и необходимости непрерывного изменения шага процесса с соответствующим отскоком, пороговой фильтрацией помех, адаптацией числа отражаемых вершин.

В то же время в информационных технологиях давно уже известен подход, который носит общее название – **распознавание образов** [3]. Распознавание образов в широком смысле трактуется как методы классификации и идентификации предметов, явлений, процессов, сигналов, ситуаций, объектов, которые характеризуются конечным набором некоторых свойств и признаков [3].

Для решения проблем прогнозирования показателей качества и эффективности технологических процессов можно использовать **теорию распознавания образов**. Основная задача распознавания образов заключается в том, чтобы исходя из обучающей последовательности определить класс, к которому принадлежит описание объекта, подвергаемого классификации или идентификации. К такой схеме приводится любая задача принятия решений, если только принятие решений базируется на изучении ранее накопленного опыта (обучение с учителем).

Реализация методов распознавания необходима в автоматизированных системах. Такое применение теории распознавания, как кластерный анализ (таксономия), выявление закономерностей во множестве экспериментальных данных, прогнозирование различных процессов или явлений, широко используется в научных исследованиях.

Известно, что все факторы технологического процесса делятся на неуправляемые (случайные) и управляемые. Как правило, случайные факторы – это характеристики исходного природного сырья. Выходные показатели – качество продукта (определяется соотношением первых двух видов факторов). В данном случае метод распознавания образов заключается в том, что собирается подробный статистический материал о процессе, а все выходные показатели делятся на два класса – удовлетворительное и неудовлетворительное качество. После соответствующей обработки собранного материала получают так

называемое решающее правило (см. например, ГОСТ Р 8.731-2010 ГСИ; ГОСТ 24297-87), под которым понимают указание или совокупность указаний, предназначенных для принятия решения относительно приемки партии продукции по результатам контроля. Особенность решающих правил заключается в том, что последовательность выполнения действий определяют путем применения относительно простых процедур над исходными данными.

Если решающее правило включает в себя только неуправляемые (случайные) параметры – показатели качества природного сырья, решающее правило обладает только предсказывающим действием. Следовательно, на основании показателей качества сырья можно будет с достаточно высокой вероятностью предсказать результаты реализации процесса, т.е. удовлетворительно или неудовлетворительно будет протекать процесс при заданных управляющих факторах.

Однако решающее правило можно трактовать и более широко. Если решающее правило включает неуправляемые (случайные) факторы (показатели качества природного сырья) и управляющие, решающее правило обладает способностью выбирать режимы, позволяющие перейти в область удовлетворительного протекания процесса.

Полученное решающее правило подлежит верификации. Оно, как и предыдущие действия, не требует больших материальных затрат. Достоинством метода является также постоянное накопление данных и непрерывная корректировка решающего правила, что приводит к адаптации данного способа управления. Схема проведения соответствующего эксперимента приведена на рисунке 1.

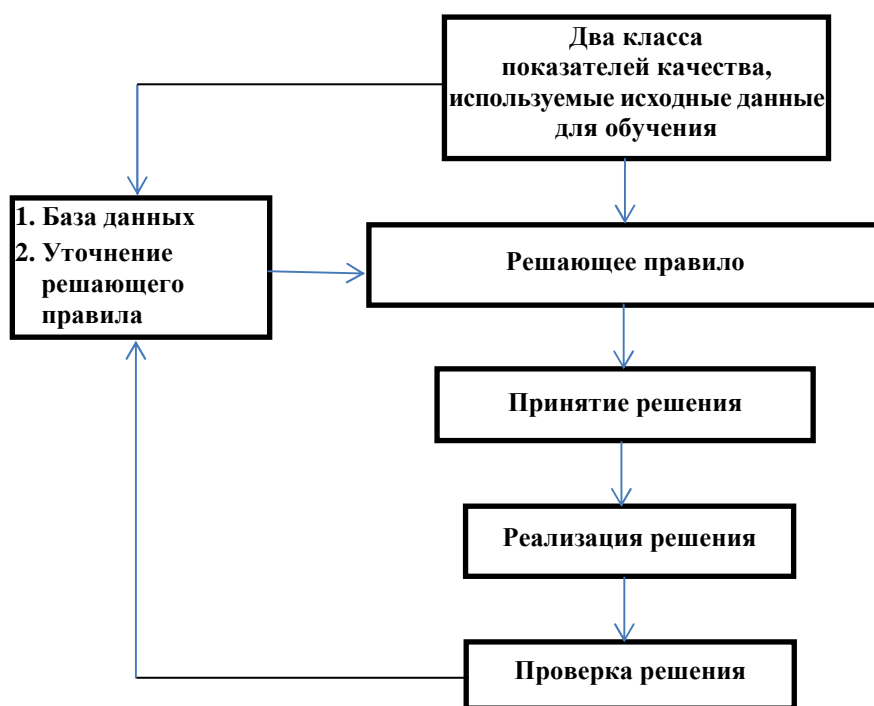


Рис. 1. Схема поддержки управления технологическим процессом методом распознавания образов

Сравнение симплексных методов и методов распознавания образов показало, что при запросе в поисковике GOOGLE на фразу «управление качеством распознавание образов» найдено 236 000 ссылок, а на фразу «управление качеством симплексные методы» всего лишь 10 000. Примерно такое же соотношение найдено в поисковой системе BING.

Следует также признать, что эволюционное планирование эксперимента – метод экспериментальной оптимизации, сочетающий многократное использование дробных и полных факторных планов с движением по градиенту функции отклика и предназначенный для совершенствования производственных объектов (ГОСТ 24026-80), также не нашел своего практического применения. Количество ссылок в GOOGLE – 64 000.

В настоящее время в технической кибернетике особое место занимает теория распознавания образов. Существует множество алгоритмов распознавания образов:

- *детерминистические* – построение решающих правил, метод построения эталонов, метод дробящихся эталонов, линейные решающие правила, метод ближайших соседей, метод потенциальных функций,

структурные (лингвистические) методы, кластерный анализ, критерии информативности и отбор информативных признаков;

- *статистические* – метод k_n ближайших соседей (правило ближайшего соседа), параметрическое оценивание распределений, метод максимума правдоподобия, случай статистически независимых признаков, распознавание при неизвестных априорных вероятностях образов, минимаксный критерий, критерий Неймана – Пирсона, последовательные процедуры распознавания, аппроксимационный метод оценки распределений по выборке, таксономия, оценка информативности признаков, иерархические системы распознавания.

Очевидно, что при наличии большого количества переменных и сложного вида поверхности раздела поиск решающего правила затруднен. В настоящее время существует достаточно большое количество статистических программ, в которых имеются соответствующие вкладки, реализующие соответствующие алгоритмы распознавания (дискриминации). Не следует, однако, думать, что методы распознавания образов способны решить любые проблемы, связанные с управлением качеством технологического процесса. Основной проблемой для данной методики является поиск факторов, которые влияют на процесс и поиск «хорошего алгоритма» для построения решающего правила.

По литературным данным, количество относительно эффективных алгоритмов составляет несколько десятков, а это свидетельствует о том, что проблема окончательно не решена. Чаще всего основная трудность связана с поиском решающего правила, удовлетворительно описывающего обучающую выборку. Большинство пакетов, которые реализуют вывод решающего правила, предлагают использовать линейную дискриминационную функцию. В случае получения отрицательного результата исследователь отказывается от дальнейшей работы. Однако проблема чаще всего решается при переходе к нелинейному решающему правилу.

Результаты работы. Для иллюстраций трудностей, связанных со сложностями получения решающего правила, приведем *пример*.

Как уже было отмечено выше, наибольшие сложности в получении решающего правила связаны с классификацией обучающей выборки на два класса, имеющих сложную поверхность раздела.

Выбор исходного описания объектов является одной из центральных задач проблемы теории распознавания образов. При удачном выборе исходного описания (пространства признаков) задача распознавания может оказаться правильной, а неудачно выбранное исходное описание может привести к сложной дальнейшей переработке информации или к отсутствию решения.

Результаты получения решающего правила для достаточно сложных поверхностей, разделяющих два класса, представлены на рисунках 2 и 3, где показаны результаты распознавания двух классов – переменные Col_1 и Col_2. Процесс распознавания контролируется переменной Col_3.

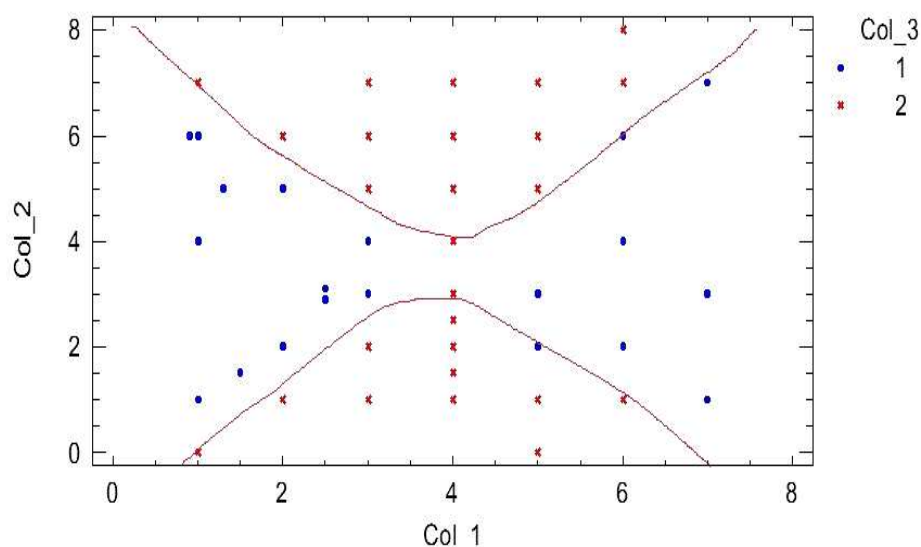


Рис. 2. Два класса, используемые для обучения, имеющие гиперболическую границу раздела

Изначально были использованы линейные решающие правила, основанные на расстоянии между объектами – точками признакового пространства (Евклидово расстояние, расстояние по Манхэттену, Чебышевское расстояние и др.), метод эталона. Очевидно, что линейное разделяющее правило не подхо-

дит для удовлетворительного решения данной задачи (табл. 1). Процент корректных результатов колеблется от 54 до 58.

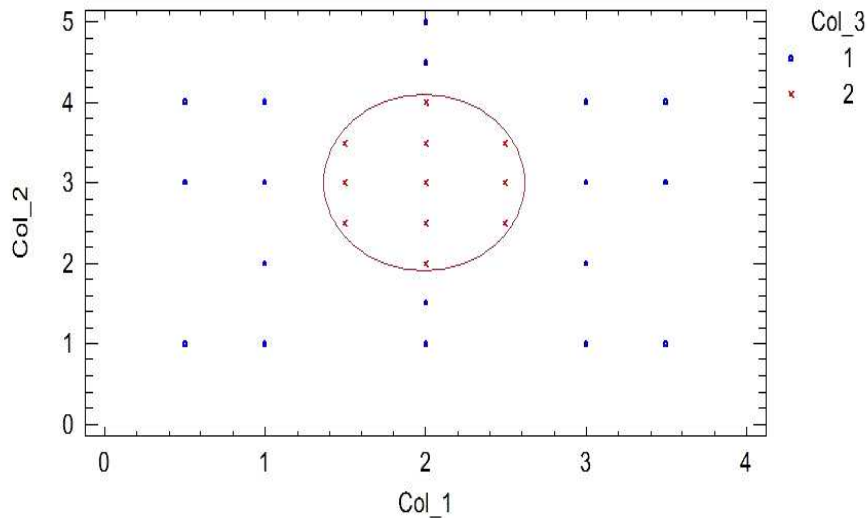


Рис. 3. Два класса, используемые для обучения, имеющие сферическую границу раздела

Таблица 1

Разделение двух классов при помощи линейного решающего правила

Линейное решающее правило (пример 1)				Линейное решающее правило (пример 2)			
Группа	Размер	Вычислено, группа 1	Вычислено, группа 2	Группа	Размер	Вычислено, группа 1	Вычислено, группа 2
1	20	13 (65 %)	7 (35 %)	1	18	8 (44 %)	10 (56 %)
2	26	12 (46 %)	14 (54 %)	2	11	4 (36 %)	7 (64 %)

В данном случае проблема решается достаточно просто. Необходимо перейти к нелинейным решающим правилам и тогда результаты резко улучшаются (табл. 2).

Таблица 2

Разделение двух классов при помощи нелинейного решающего правила

Нелинейное решающее правило (пример 1)				Нелинейное решающее правило (пример 2)			
Группа	Размер	Вычислено, группа 1	Вычислено, группа 2	Группа	Размер	Вычислено, группа 1	Вычислено, группа 2
1	20	19 (95 %)	1 (5 %)	1	18	15 (83 %)	3 (17 %)
2	26	1 (4 %)	25 (96 %)	2	11	0 (0 %)	11 (100 %)

Очевидно, что доля корректных результатов составляет 92...94 %. Использование адаптивных методов разделяющих границ в ряде практических задач является наиболее предпочтительным и возможным. Они позволяют организовать последовательный алгоритм уточнения коэффициентов, по мере поступления информации, и незаменимы в условиях нестационарности исследуемого процесса. В основу положен Байесовский подход, исходящий из статистической природы наблюдений [4].

За основу берется предположение о существовании вероятностной меры на пространстве образов, которая либо известна, либо может быть оценена. Цель состоит в разработке такого классификатора, который будет правильно определять наиболее вероятный класс для пробного образа. Тогда задача состоит в определении «наиболее вероятного» класса. На основе этих данных необходимо построить байесовский классификатор:

$$g_i(x) = \ln(P(\Omega_i | x)) = -\frac{x - \mu_i}{\Sigma_i} (x - \mu_i)^T + \ln P(\Omega_i) - \frac{l}{2} \ln(2\pi) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i|,$$

где $P(\Omega_i | x)$ называется апостериорной вероятностью, поскольку задает распределение индекса класса после эксперимента (a posteriori, т.е. после того, как значение вектора признаков x было получено); μ_i – математическое ожидание случайной величины x в классе Ω_i ; Σ_i – матрица ковариации размерности $l \times l$ для класса Ω_i ; $|\Sigma_i|$ – определитель матрицы ковариации.

Байесовский классификатор является квадратичным классификатором. Эта функция представляет собой квадратичную форму. Следовательно, разделяющая поверхность $g(x)$ является гиперповерхностью второго порядка.

$$g_1(x) - g_2(x) = 0.$$

Подставив ряд значений в эти формулы можно получить уравнения описывающие поверхности второго порядка (окружность или эллипс, гиперболу и др.).

Пример

$$\text{Пусть } P\Omega_1 = P\Omega_2, \mu_1 = (0,0), \mu_2 = (0,0), \Sigma_1 = \begin{pmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,15 \end{pmatrix}, \Sigma_2 = \begin{pmatrix} 0,15 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix},$$

подставив эти значения в формулу Байеса, получим уравнение гиперболы:

$$(x_1 + 2)^2 - x_2^2 = 6.$$

Еще одним приемом, позволяющим улучшить качество разделения, является использование решающего правила в виде кусочно-линейных функций. Так, отобрав неверно классифицированные объекты с результатом 52 % и повторив процедуру вновь, получим уже 71 % правильно распознанных объектов. Повторяя эту процедуру дальше, можно достигнуть примерно такого же результата, как и при использовании нелинейной функции.

Таким образом, исходя из всего изложенного можно сделать **вывод** о том, что использование нелинейного решающего правила или кусочно-линейных функций позволяет решить достаточно сложные задачи, возникающие при управлении химико-технологическими процессами в условиях неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарайский, В.Н., Усреднение руд / Зарайский, В.Н., Николаев К.П. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
2. Растрингин, Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Растрингин. – Рига: Зинанте, 1981. – 375 с.
3. Фомин, Я.А. Распознавание образов: теория и применения / Я.А. Фомин. – 2-е изд. – М.: ФАЗИС, 2012. – 429 с.
4. Местецкий, Л.М. Математические методы распознавания образов: курс лекций / Л.М. Местецкий. – М.: МГУ, 2004. – С. 8–15.

Поступила 22.01.2015

ASSISTANCE TO THE MANAGEMENT OF CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROCESS UNDER UNCERTAINTY

A. SPIRIDONOV, S. JAKUBOWSKI, M. ZILBERGLEIT

The possibility of control of chemical and technological process by methods of active experiment is considered. In order to control the real technological process use of the methods of recognition in the form of non-linear and piecewise linear decision rule is proposed. An example of such an approach for the separation of complex classes, which cannot be separated by a linear discriminant function, is given.

УДК 663.551.4

**СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
КЛАПАННОЙ ТАРЕЛКИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ****Д.Н. МАЙТАМ***(Полоцкий государственный университет)*

Представлен сопоставительный анализ изменения гидравлического сопротивления клапанной тарелки новой конструкции. Приведены результаты экспериментальных исследований в виде графических зависимостей гидравлического сопротивления разработанной тарелки от скорости газа в колонне. Выявлено, что при относительно невысоком гидравлическом сопротивлении (0,4...1,6 кПа) эффективность усовершенствованной клапанной тарелки характеризуется высокими показателями.

В промышленности часто используются колонные аппараты, оборудованные разнообразными контактными массообменными устройствами. Такое разнообразие конструкций закономерно, так как невозможно существование универсальных аппаратов, удовлетворяющих всем требованиям практического использования массообменных аппаратов в широком спектре технологических процессов.

В данной работе рассматривается одна из характеристик клапанной тарелки новой усовершенствованной конструкции – гидравлическое сопротивление.

Процессы массопередачи можно разделить на две группы:

- к одной группе относятся процессы (абсорбция, экстракция и др.), в которых участвуют минимально три вещества: первое находится только в одной фазе, второе – только в другой, а третье – переходит из одной фазы в другую и представляет собой распределяемое между фазами вещество. Первое и второе вещество – лишь носители распределяемого вещества, и сами не переходят из фазы в фазу. Так, например, при поглощении аммиака водой из его смеси с воздухом вода и воздух служат носителями распределяемого вещества – аммиака;

- к другой группе относятся процессы (например, перегонка), в которых вещества, составляющие две фазы, обмениваясь компонентами, сами непосредственно участвуют в массопередаче и уже не могут рассматриваться как инертные носители распределяемого вещества.

Абсорбция – процесс поглощения индивидуального газа, а также избирательного поглощения одного или нескольких компонентов газовой смеси жидким поглотителем, абсорбентом.

Поглощение газа может происходить либо за счет его растворения в абсорбенте, либо в результате химического взаимодействия с абсорбентом. В первом случае процесс называют физической абсорбцией, во втором – хемосорбцией. Возможно также сочетание обоих механизмов процесса. Абсорбируемые компоненты газовой смеси условимся называть абсорбтивом, а неабсорбируемые – инертном.

Тарельчатые абсорберы представляют собой, как правило, вертикальные колонны, внутри которых на определенном расстоянии друг от друга размещены горизонтальные перегородки – тарелки, с помощью которых осуществляется направленное движение фаз и многократное взаимодействие жидкости и газа.

В настоящее время в промышленности применяются разнообразные конструкции тарельчатых аппаратов. По способу слива жидкости с тарелок барботажные абсорберы можно подразделить на колонны:

- 1) с тарелками со сливными устройствами;
- 2) с тарелками без сливных устройств.

Эффективность тарелок любых конструкций в значительной степени зависит от гидродинамических режимов их работы. В зависимости от скорости газа и плотности орошения различают три основных гидродинамических режима работы барботажных тарелок: пузырьковый, пенный и струйный, или инжекционный. Эти режимы отличаются структурой барботажного слоя, которая в основном определяет его гидравлическое сопротивление и высоту, а также величину поверхности контакта фаз [1].

Отметим, что *колпачковые тарелки* устойчиво работают при значительных изменениях нагрузок по газу и жидкости. Этот показатель особенно важен при организации процесса в производственных условиях. Но недостатки колпачковых тарелок довольно существенны:

- они сложны по устройству;
- для их изготовления требуются значительные затраты (дорогостоящий металл);
- тарелки этого типа отличаются большим гидравлическим сопротивлением и малой предельно допустимой скоростью газа.

Вследствие этого колонны с колпачковыми тарелками вытесняются более эффективными конструкциями тарельчатых аппаратов.

Клапанные тарелки. Достоинством такого типа тарелок, прежде всего, следует считать их гидродинамическую устойчивость и высокую эффективность в широком интервале изменения нагрузок по газу. Достоинством клапанных тарелок также является динамический, переменный режим работы. Подвижные клапаны в зависимости от паровой нагрузки поднимаются и опускаются, регулируя площадь свободного сечения тарелки. Вследствие этого в широком пределе нагрузок скорость паров в отверстиях тарелки существенно не меняется.

Недостатками таких тарелок являются:

- повышенное их гидравлическое сопротивление, обусловленное весом клапана;
- усложненная конструкция тарелки.

Все вышеуказанные достоинства тарелок (как колпачковой, так и клапанной) учтены в новой конструкции тарелки (рис. 1), разработанной автором данного исследования с коллегами, для повышения эффективности проведения массообменных процессов.

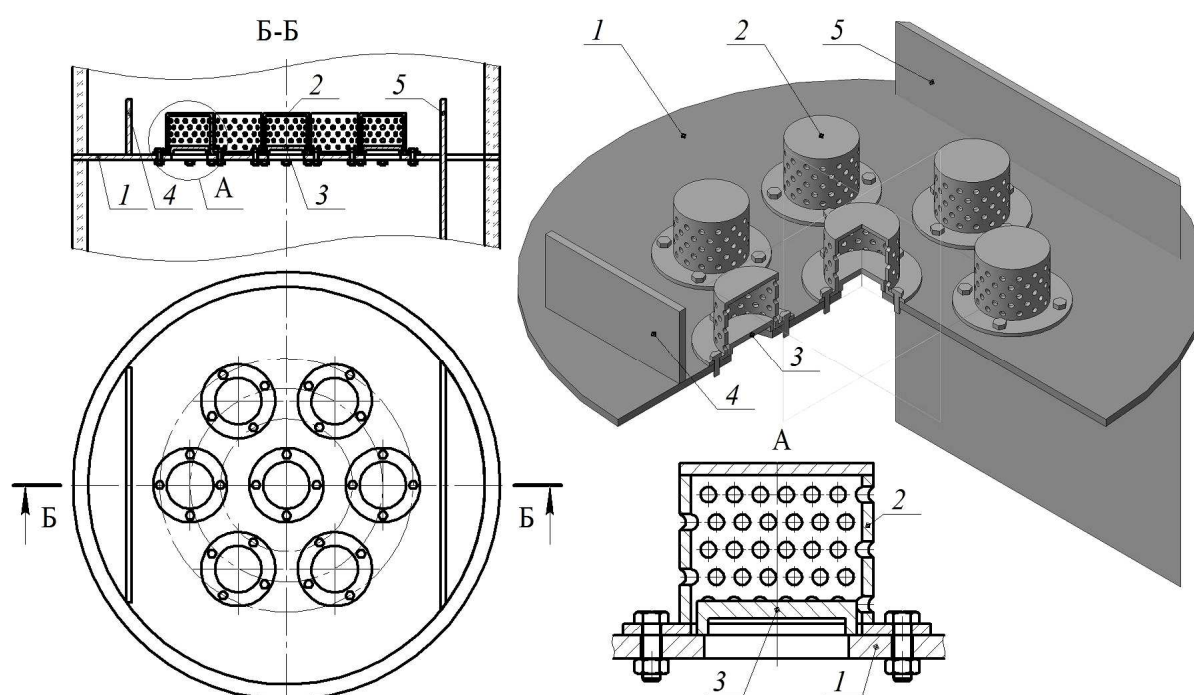


Рис. 1. Конструкция разработанной клапанной тарелки:

1 – тарелка; 2 – колпачок; 3 – клапан; 4 – приемный порог; 5 – перегородка сливного стакана

Отличительной особенностью предлагаемой тарелки является наличие перфорированных колпачков 2, которые крепятся к тарелке болтами, и саморегулирующихся дисковых клапанов 3, способных подниматься при движении пара (газа).

Диаметр отверстий в тарелке для прохода газовой фазы несколько меньше диаметра дисковых клапанов 3 и перфорированных колпачков 2, благодаря чему клапан удерживается на тарелке. Высота подъема клапана ограничивается высотой колпачка.

Исследовались два типа колпачка:

- с высоким подъемом клапана (до 27 мм);
- низким подъемом клапана (до 21 мм).

Кроме этого перфорация колпачка была выполнена в двух вариантах: 2 и 3 мм.

Принцип работы тарелки следующий. Свободно лежащий над отверстием в тарелке клапан с изменением расхода газа своим весом автоматически регулирует величину площади зазора между клапаном и плоскостью тарелки для прохода газа и тем самым поддерживает постоянной скорость газа при его истечении в барботажный слой. При этом с увеличением скорости газа в колонне гидравлическое сопротивление клапанной тарелки увеличивается незначительно. Жидкость поступает по трубке

сверху на тарелку, переливается через приемный порог 4. Снизу поднимается газ, проходя через прорезы в колпачках, попадает в жидкость и барботирует через неё в виде пузырьков. При увеличении столба жидкости над тарелкой происходит переливание через перегородку 5, жидкость стекает вниз, откуда удаляется из колонны.

Целью данного исследований являлось определение гидравлического сопротивления усовершенствованной клапанной тарелки в зависимости от некоторых геометрических особенностей клапана и диаметра отверстий в нем.

Фиктивную (приведенную) скорость воздуха в колонне w , м/с, то есть отнесенную к полному сечению колонны, находили по следующему уравнению [1]:

$$w = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2}, \quad (1)$$

где V – объемный расход воздуха в колонне, определяемый с помощью диафрагмы и дифманометра, м³/с; d – внутренний диаметр колонны, равный 0,144 м.

Гидравлическое сопротивление тарелки определяли по разности статических давлений под и над тарелкой. Плотность орошения в колонне q , м³/(м²·ч), согласно уравнению расхода, составила

$$q = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

где Q – объемный расход жидкости в колонне, определяемый с помощью ротаметра, м³/ч.

Диапазон устойчивой работы усовершенствованной клапанной тарелки наблюдается при скорости воздуха 0,6...1,7 м/с. При этом на тарелке возникает газожидкостная дисперсная система – пена, что соответствует пенному режиму работы тарелки. В указанном режиме контактирование газа и жидкости происходит на поверхности пузырьков и струй газа, а также на поверхности капель жидкости, которые в большом количестве образуются над барботажным слоем при выходе пузырьков газа из барботажного слоя и разрушении их оболочек. В пенном режиме поверхность контакта фаз на тарелке максимальна.

Получены графические зависимости величины гидравлического сопротивления новой конструкции орошаемой клапанной тарелки.

Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления сухой и орошаемой тарелки в зависимости от фактора разделения $F = w \sqrt{\rho_{\text{газа}}}$ представлены на рисунках 2–5.

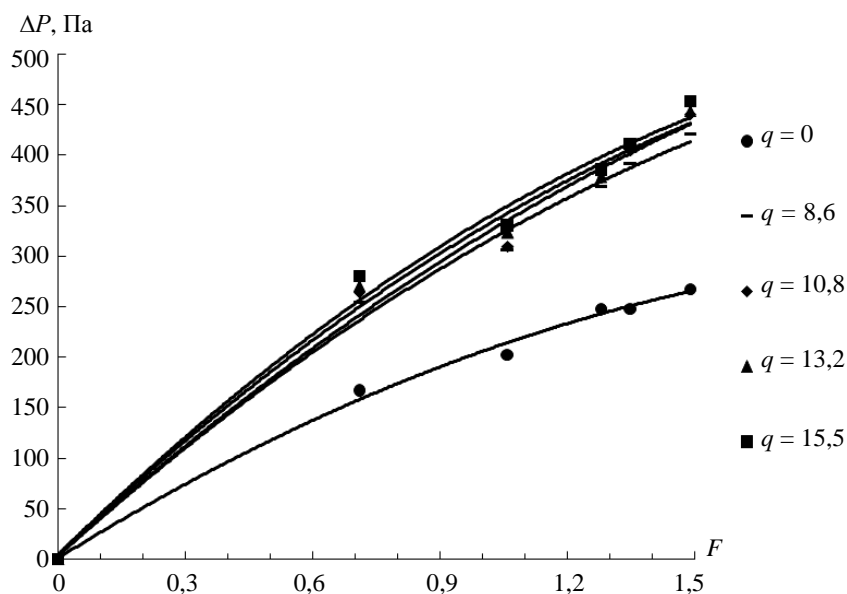


Рис. 2. Гидравлическое сопротивление разработанной клапанной тарелки при различных плотностях орошения q , м³/(м²·ч); короткий клапан, диаметр отверстий в колпачке 2 мм

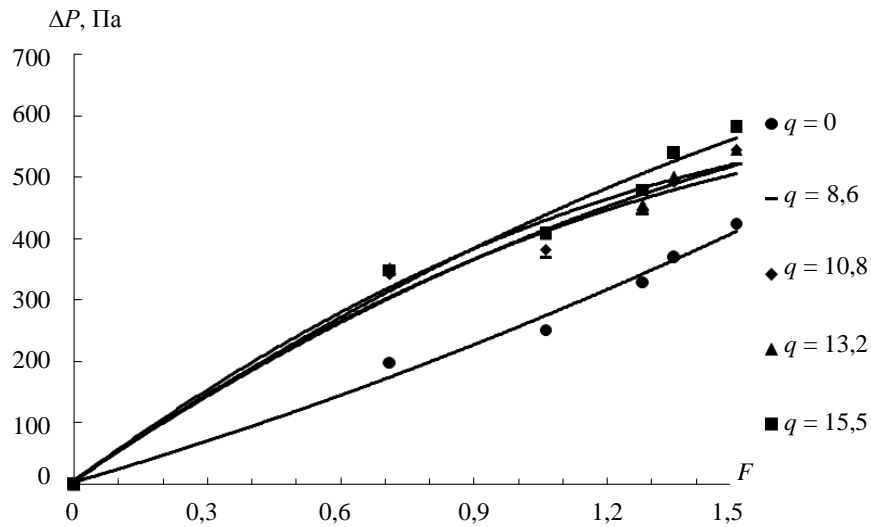


Рис. 3. Гидравлическое сопротивление разработанной клапанной тарелки при различных плотностях орошения $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; длинный клапан, диаметр отверстий в колпачке 2 мм

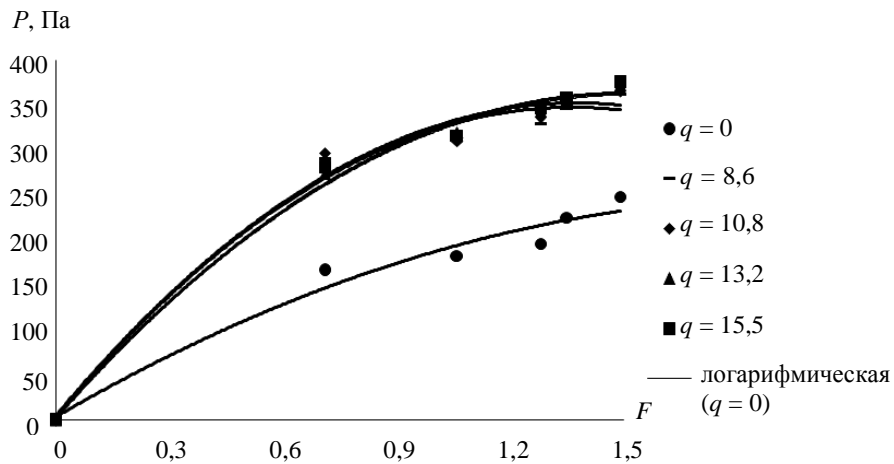


Рис. 4. Гидравлическое сопротивление разработанной клапанной тарелки при различных плотностях орошения $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; короткий клапан, диаметр отверстий в колпачке 3 мм

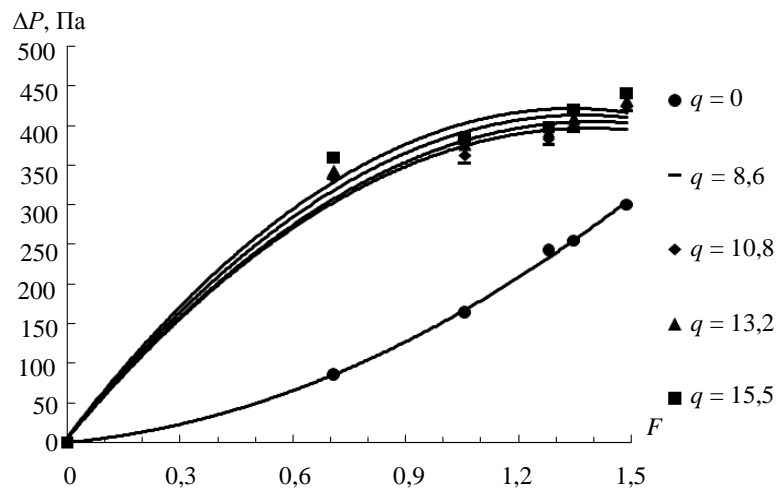


Рис. 5. Гидравлическое сопротивление разработанной клапанной тарелки при различных плотностях орошения $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; длинный клапан, диаметр отверстий в колпачке 3 мм

Анализ представленных графиков показал, что с увеличением скорости увеличивается гидравлическое сопротивление, причем увеличение плотности орошения также ведет к его незначительному увеличению.

Стоит отметить незначительное повышение гидравлического сопротивления тарелки при работе с длинным клапаном, что хорошо прослеживается на рисунках 2–5.

Как и следовало ожидать, увеличение диаметра отверстий в колпачке снижает гидравлическое сопротивление тарелки на 10...15 %.

Сравнение эффективности некоторых конструкций тарельчатых контактных устройств рассмотрено в [2, рис. 4.4]. По приведенным в источнике данным, лучшими показателями по гидравлическому сопротивлению обладают ситчатые и S-образные тарелки с клапанами, клапанные балластные тарелки занимают промежуточное положение.

Заключение. Разработанная тарелка имеет относительно невысокое гидравлическое сопротивление и высокую эффективность, что позволяет широко использовать данный тип тарелок для проведения массообменных процессов.

Следует отметить, что универсальных конструкций тарелок не существует. При выборе конкретного типа тарелок следует отдать предпочтение той конструкции, основные (не обязательно все) показатели эффективности которой в наибольшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым исходя из функционального назначения тарелки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2005. – 753 с.
2. Ахметов, С.А. Лекции по технологии глубокой переработки нефти в моторные топлива: учеб. пособие / С.А. Ахметов. – СПб.: Недра, 2007. – 312 с.

Поступила 30.01.2015

COMPARATIVE ANALYSIS OF CHANGE OF HYDRAULIC RESISTANCE OF THE VALVATE PLATE OF THE NEW DESIGN

D. MAITHAM

In the article the new design of valve collar is presented. The results of experimental researches in the form of graphic dependences of hydraulic resistance of the developed plate on gas speed in a column are resulted. The efficiency of improved valve collar at rather low hydraulic resistance (0,4...1,6 kPa) is rather high.

УДК 628.34; 628.35

АНАЛИЗ РАБОТЫ СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД НА СТАНЦИИ АЭРАЦИИ ГОРОДА ВИТЕБСКА

канд. техн. наук, доц. В.Д. ЮЩЕНКО
(Полоцкий государственный университет);
А.В. ГАЛУЗО
(УП «Витебскводоканал»);
Т.С. КУПРИЯНЧИК
(Завод «Полимир» ОАО «Нафтан»)

Рассматривается проблема удаления фосфора из сточных вод. Объектом исследования является станция аэрации УП «Витебскводоканал». Проанализирована технологическая схема очистки сточных вод, их количество и состав, а также работа очистных сооружений станции аэрации для удаления соединений фосфора из сточных вод. Сделан вывод, что для повышения эффективности удаления фосфора из сточных вод на станции аэрации города Витебска необходимы реконструкция и модернизация блока аэротенков-вытеснителей и вторичных отстойников с применением технологической схемы, основанной на процессах нитри-денитрификации. После аэротенков и биоблоков следует предусмотреть доочистку сточных вод для более полного удаления фосфора с применением химических реагентов.

На станцию аэрации города Витебска поступает смесь хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод, количество и состав которых постоянно изменяется в соответствии с экономической ситуацией в республике. Анализ состава сточных вод показывает, что доля сточных вод хозяйственно-бытового назначения составляет порядка 65...70 %, доля промышленных стоков – 30...35 %.

Канализационные очистные сооружения Витебска функционируют с 1968 года. В зависимости от объема поступления и характеристик сточных вод очистные сооружения неоднократно перестраивались, реконструировались и расширялись. Последнее изменение произошло в 2008 году. Проектная производительность станции аэрации в целом составляет 120 тыс. м³/сут, но отдельные сооружения могут обрабатывать до 160 тыс. м³/сут сточных вод.

По данным 2013–2014 годов, средние показатели сточных вод составляют: взвешенные вещества – 385 мг/дм³; химическое потребление кислорода (ХПК) – 780 мгО₂/дм³; биохимическое потребление кислорода (БПК₅) – 250 мгО₂/дм³; азот по Кьельдалю – 58,8 мг/дм³; фосфор общий – 5,9 мг/дм³ [4].

Существующая в настоящее время технологическая схема очистки сточных вод состоит из следующих основных узлов: механическая очистка; биологическая очистка совместно с вторичным отстаиванием; обеззараживание и выпуск очищенных стоков в реку Западная Двина с требуемыми нормативными концентрациями по регламентируемым загрязнителям. Используются выпуски каскадного и сосредоточенного глубинного типов, имеется возможность между ними перепуска сточных вод.

Предварительное (механическое) осветление сточных вод осуществляется на решетках и песколовках, а также в первичных радиальных отстойниках диаметром 28...30 м в количестве 4 шт. Взвешенные вещества, выпадающие в осадок в первичных отстойниках, направляются на иловые площадки. После решеток, песколовок и первичных отстойников часть сточных вод в напорном режиме направляется на биоблоки (4 шт.), другая – на очистку в 2-х коридорные аэротенки (3 секции) и вторичные отстойники диаметром 30...40 м (4 шт.). Активный ил из вторичных отстойников делится на две части: циркуляционный, который возвращается на сооружения биологической очистки, и избыточный – подается на иловые площадки. Биоблок представляет собой сооружение с совмещенной системой биологической очистки, в котором протекают процессы окисления растворенных органических загрязнений, трансформация соединений азота и частичное удаление соединений фосфора. Конструктивной особенностью биоблока является то, что в одном сооружении совмещаются аэротенки с разными зонами аэробности и вторичные отстойники.

Для контакта очищенных сточных вод с дезинфицирующим средством используются контактные горизонтальные и вертикальные резервуары (6 шт.).

Целью работы станции аэрации является очистка сточных вод от минеральных и органических веществ, в том числе и от биогенных элементов, для предотвращения негативных последствий их воздействия на поверхностные водоемы.

Биогенные элементы представляют собой вещества, которые постоянно входят в состав различных организмов и играют важную роль в процессах их жизнедеятельности, т.е. имеют по отношению к ним определенное биологическое значение. К наиболее важным биогенным элементам относятся кислород, азот, фосфор, углерод и водород.

В настоящее время содержание биогенных элементов (в основном азота и фосфора) в поверхностных и подземных водоисточниках постоянно увеличивается, что приводит к их экологическим проблемам. Это обусловлено прежде всего тем, что очистные сооружения и технологии, запроектированные в 60–70-х годах прошлого столетия, не справляются с современной антропогенной нагрузкой. Причинами этого являются: использование новейших составов моющих средств; физиологические отходы населения и животных; промышленные технологии; сброс с сельскохозяйственных территорий талых и дождевых стоков, содержащих опасные загрязняющие вещества. Например, в разрабатываемых новых составах моющих средств (защита нагревательных элементов стиральных машин от накипи, улучшение процесса стирки загрязненного белья и пр.) содержание полифосфатов в составе моющих средств может достигать 30...50 %.

Попадание этих веществ, содержащих высокую концентрацию органических веществ, биогенных элементов и других загрязнителей, в водоемы и водостоки нарушают в них естественные процессы и вызывают эвтрофикацию водоемов. Эвтрофикация – процесс роста биологической растительности водоемов, который происходит вследствие превышения баланса питательных веществ. Он сопровождается чрезмерным развитием водорослей, особенно зеленых, сине-зеленых и диатомовых, преобладанием нежелательных видов планктона, нарушением жизнедеятельности рыб. Продукты метаболизма водорослей придают воде неприятный запах, могут вызывать кожные аллергические реакции и желудочно-кишечные заболевания у людей и животных [1].

В результате таких отрицательных воздействий постепенно в водоеме начинают преобладать анаэробные процессы. В итоге уничтожается большая часть аэробной флоры и фауны.

В период цветения в водоеме повышается величина рН, падает содержание растворенного кислорода, обнаруживаются (с помощью методов газожидкостной хроматографии) различные яды, продуцируемые цианобактериями, возникают «заморные» явления у рыб, затрудняется процесс очистки воды из водохранилищ (цианобактерии засоряют фильтры) и ухудшается качество питьевой воды. Ведущая роль при возникновении цветения водоемов принадлежит цианобактериям, которые присутствуют в каждом водоеме (обычно в норме), но при его эвтрофировании наблюдается значительное развитие этих бактерий и доминирование в планктоне. Своё название цианобактерии (раньше систематики относили их к сине-зеленым водорослям) получили из-за зеленого их окрашивания в водоеме, высыхая на берегу, в зоне «заплеска» волны при усилении интенсивности освещения, они приобретают синее или голубое окрашивание благодаря пигменту фикоцианину [2].

В момент цветения цианобактерии (*Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Nodularia*, *Oscillatoria*) продуцируют нейротоксины (вызывающие заболевания центральной нервной системы) и гепатоксины (вызывающие разрушение или рак печени).

Все эти процессы протекают относительно медленно и даже в условиях высокой антропогенной нагрузки занимают десятилетия, но именно в этом заключается главная опасность эвтрофирования. Изменения экосистемы водоема достаточно глубоки и периоды возможного восстановления экосистем оказываются длительными.

Фосфор (P) – элемент 15-й группы (по устаревшей классификации – главной подгруппы пятой группы) второго периода периодической системы химических элементов, атом фосфора характеризуется меньшей энергией ионизации и имеет больший радиус. Это означает, что неметаллические признаки у фосфора выражены слабее, чем, например, у азота. Поэтому для фосфора реже встречается степень окисления –3 и чаще +5. Мало характерны и другие степени окисления. В природе фосфор встречается только в виде соединений; важнейшее из них – фосфат кальция – минерал апатит. Фосфор имеет несколько аллотропных модификаций: белый, красный, черный и др.

Содержащийся в сточных водах фосфор можно подразделить на следующие фракции [8]:

$$C_{P_{общ}} = S_{PO_4} + S_{ПФ} + S_{P_{орг}} + X_{P_{орг}},$$

где $C_{P_{общ}}$ – общий фосфор; S_{PO_4} – растворенный неорганический ортофосфат; $S_{ПФ}$ – растворенный неорганический полифосфат; $S_{P_{орг}}$ – растворенный органический фосфор; $X_{P_{орг}}$ – взвешенный органический фосфор.

Составление баланса фосфора в сточных водах по отдельным стадиям их очистки производилось пересчетом всех его соединений на величину самого элемента.

Концентрация фосфора в сточных водах, поступающих на станцию аэрации города Витебска, отображена на рисунке 1.

Существующие способы удаления фосфорных соединений из сточных вод предполагают перевод растворенного фосфора в его нерастворимую форму, которую возможно отделить в процессе разделения, чаще всего гравитационным осаждением в отстойных сооружениях (первичные и вторичные отстойники, контактные резервуары) [3; 5].

Под взвешенными фосфорсодержащими веществами понимают органические фосфаты, однако в эту группу могут входить химически осажденные ортофосфаты и биологически связанные полифосфаты.

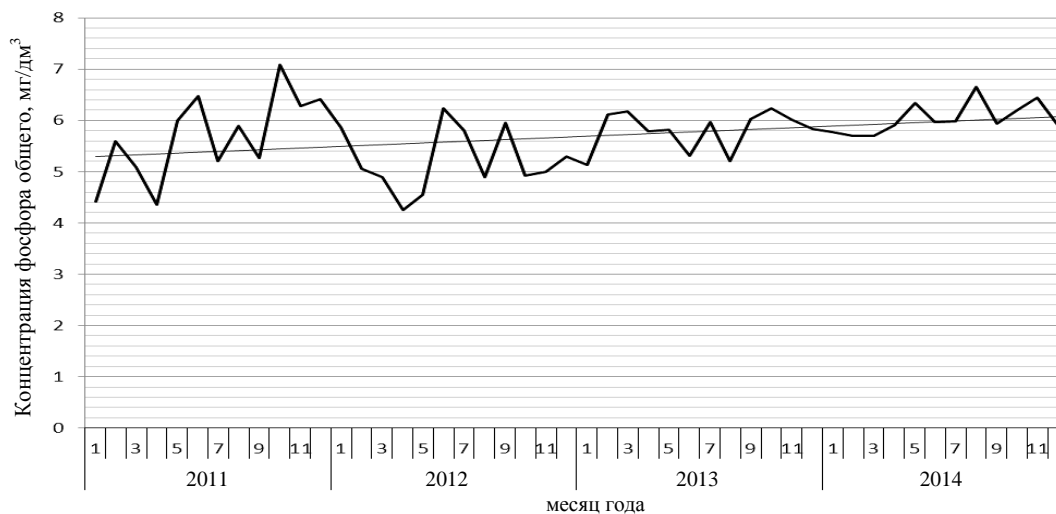


Рис. 1. Концентрации общего фосфора в исходной сточной воде за 2011–2014 годы

Для оценки эффективности работы очистных сооружений был проведен анализ основных звеньев технологической схемы [4]. Эффективность удаления фосфора в канализационных очистных сооружениях станции аэрации (г. Витебск) на отдельных этапах очистки сточных вод за 2014 год представлена на рисунке 2. Биологическая очистка 1 линии представляет собой комплекс сооружений: двухкоридорные аэротенки – вторичные отстойники – горизонтальные контактные резервуары и выпуск каскадного типа; 2 линия: биоблоки – вертикальные контактные резервуары – выпуск сосредоточенного глубокого типа.

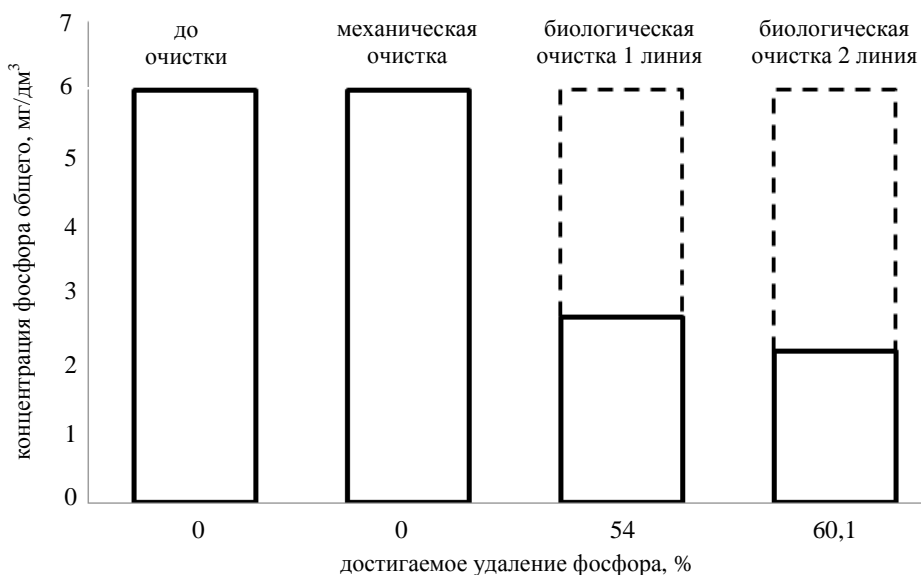


Рис. 2. Снижение концентрации фосфора на разных стадиях очистки сточных вод станции аэрации города Витебска

Процесс первичного отстаивания снижает концентрации загрязнений в поступающих на биологическую очистку сточных водах: по взвешенным веществам на 51 %; по ХПК на 33 %; по БПК₅ на 18...20 %; по азоту аммонийному на 7 %, в то время как концентрация фосфора либо не снижается, либо увеличивается до 5 %.

Сравнивая результаты эффективности очистки двух линий биологической очистки, можно отметить, что и аэротенки, и биоблоки с различными зонами аэрации в среднем с одинаковой эффективностью удаляют такие загрязнения, как ХПК (90...91 %), БПК₅ (92 %). По азоту аммонийному и фосфору

более высокие результаты эффективности очистки наблюдаются в работе комплексных сооружений, био-блоков. По азоту аммонийному – 94 % (после аэротенков – 82 %), по фосфору общему от 50 до 69 % в зависимости от режима работы сооружения (после аэротенков – от 43 до 65 %).

В результате биологического разложения органических веществ можно считать, что на стадии биохимической очистки сточных вод полифосфаты гидролизуются до ортофосфатов (рис. 3), в эту же форму также переходят растворимые фосфорсодержащие соединения [4; 6; 8].

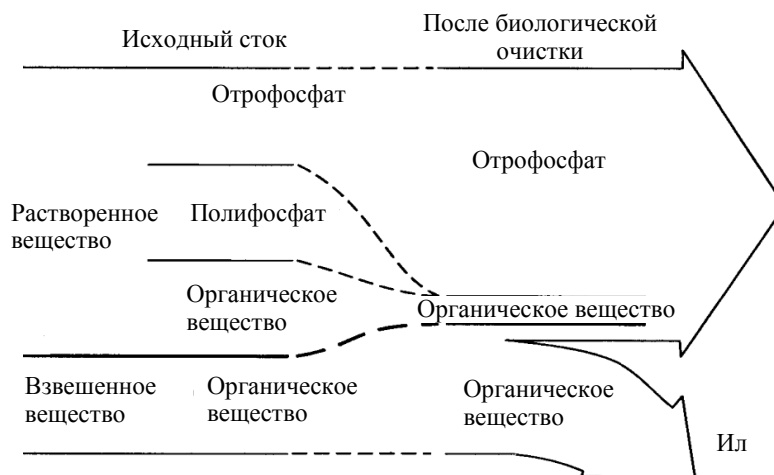


Рис. 3. Формы фосфорных веществ в процессе биохимической очистки сточных вод

Концентрации общего фосфора в исходных и очищенных сточных водах на станции аэрации города Витебска (средние за месяц 2014 г.) в сравнении с допустимой концентрацией общего фосфора в очищенных сточных водах при их поступлении в реку Западная Двина представлены в таблице.

Концентрация общего фосфора в исходных и очищенных сточных водах на станции аэрации города Витебска (средние за месяц 2014 г.)

№ п/п	Концентрации общего фосфора (мг/дм ³) в местах отбора проб сточной воды							
	Приемная камера (вход на ОС)	выпуски очистных сооружений				допустимые концентрации общего фосфора в очищенных сточных водах при их поступлении в реку Западная Двина		
		выпуск № 1, каскадный	Э, %	выпуск № 2, сосредоточенный	Э, %	Временное разрешение на специальное водопользование	ТКП 17.06-08-2012	Рекомендация ХЕЛКОМ 28/5*
1	5,78	2,81	51	2,27	61			
2	5,72	2,94	49	2,09	64			
3	5,7	3,36	41	2,09	63			
4	5,91	3,09	48	2,52	57			
5	6,34	3,25	49	2,88	55			
6	5,96	2,9	51	2,3	61			
7	5,98	3,27	45	2,85	52			
8	6,65	2,1	68	1,95	71			
9	5,92	2,27	62	2,96	50			
10	6,22	2,35	62	2,29	63			
11	6,44	2,21	66	2,35	64			
12	5,9	3,2	46	2,5	57			
среднее	6,06	2,78	54	2,4	60,1	3,5	2,0	0,5

Примечание. ХЕЛКОМ (The Helsinki Commission, **HELCOM**) является руководящим органом Конвекции от 1992 года по защите морской среды Балтийского моря, известной под названием «Хельсинская конвекция».

Заключение. Работу очистных сооружений по удалению фосфора из сточных вод в пределах временных норм Спецводопользования можно считать удовлетворительной, однако этого недостаточно для достижения требований ТКП 17.06-08-2012 и рекомендаций ХЕЛКОМа (превышение по содержанию фосфора общего 0,4...0,78 и 1,9...2,28 мг/дм³).

Для повышения эффективности удаления фосфора из сточных вод на станции аэрации города Витебска необходимо провести реконструкцию и модернизацию блока аэротенков-вытеснителей и вторичных отстойников с применением технологической схемы, основанной на процессах нитри-денитрификации.

После аэротенков и биоблоков следует предусмотреть доочистку сточных вод для более полного удаления фосфора с применением химических реагентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долина, Л.Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов: моногр. / Л.Ф. Долина. – Днепропетровск: Континент, 2011.
2. Жмур, Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н.С. Жмур. – М.: Акварос, 2003.
3. Зейфман, Е.А. Интенсификация очистки сточных вод от биогенных элементов / Е.А. Зейфман, Е.А. Лебедева, Г.А. Тихановская. – Вологда: ВоГТУ, 2003.
4. Техническое и технологическое обследование работы аэротенков станции аэрации города Витебска: отчет о НИР / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк: ПГУ, 2012.
5. Смир, Э. Пособие специалиста по очистке стоков / Э. Смир, М. Фишер. – 14-е изд. – Варшава: Зейдель Пживецки, 2002.
6. Технический справочник по обработке воды: в 2 т.; пер. с фр. – СПб.: Новый журнал, 2007.
7. Порядок установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: ТКП 17.06-08-2012(02120). – М.: РУП ЦНИИКИВР, 2012.
8. Очистка сточных вод, биологические и химические процессы / М. Хенце [и др.]; пер. с англ. – М.: Мир, 2009.

Поступила 30.01.2015

ANALYSIS OF WORK FOR REMOVAL OF STRUCTURES PHOSPHORUS COMPOUNDS FROM WASTEWATER AERATION STATION THE CITY OF VITEBSK

V. YUSHCHANKA, A. HALUZA, T. KUPRYIANCHYK

The article provides information on the problem of phosphorus removal from wastewater. The object of the study is to aeration station UE "Vitebskvodokanal". Technological scheme considered sewage waters, the amount and composition of wastewater. The analysis of sewage treatment plants aeration station for removing phosphorus from wastewater.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Данилов В.А., Данилов А.А.</i> Управление топологией некруглых поверхностей, обработанных по схемам неполного формообразования	2
<i>Голембиевский А.И.</i> Комбинированные подклассы образования реальных поверхностей при формообразующей обработке	10
<i>Попок Н.Н., Максимчук А.С., Портянко С.А.</i> Совершенствование системы закрепления пластин режущих и блоков режущих в блочно-модульных режущих инструментах	16
<i>Турищев Л.С.</i> К вопросу вычисления собственных частот и собственных форм свободных прямоугольных пластинок	23
<i>Седель О.Я.</i> Синтез дифференциального привода регулирования технологического процесса на ткацких автоматических станках	28
<i>Завистовский С.Э., Завистовский В.Э.</i> Остаточный ресурс восстановленных коленчатых валов	34
<i>Николайчук В.Я., Дудан А.В., Кожевникова Е.Е., Лопата Л.А.</i> Определение оптимальных режимов процесса электроконтактного припекания порошковых покрытий	39
<i>Кострицкий В.В., Лисовский А.Л., Дудан А.В.</i> Создание микрорельефа на внутренней поверхности гильзы цилиндра с помощью лазерного излучения	45
<i>Иванов В.П., Дронченко В.А.</i> Моделирование процесса развития ударной волны, возникающей при работе пневматического излучателя	54
<i>Мажугин Е.И., Пашкевич А.В.</i> Очистка моющих растворов управляемым трехпродуктовым гидроциклоном	60
<i>Иванов В.П., Уваров Г.А.</i> Диагностирование автомобильных бензиновых двигателей по динамическим параметрам отработавших газов и вибрации корпуса	65

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

<i>Кастрюк А.П., Дудан А.В., Вигерина Т.В.</i> Восстановление деталей машин с учетом влияния теплофизических и механических свойств материалов	70
<i>Крыленко А.В.</i> Критериальная оценка деградации структуры теплоустойчивых хромомолибденовых сталей змеевиков трубчатых печей	75
<i>Долгих А.М., Забагонский А.И., Гайкевич Е.И.</i> Исследование процесса диффузионного хромирования в силикотермических смесях	80
<i>Вигерина Т.В., Штемпель О.П., Фруцкий В.А.</i> Конструирование композиционного материала на основе металлоотходов	87

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Шведов А.П., Нестерович М.Г.</i> Переработка кислого гудрона производства сульфонатных присадок в битумные материалы методом термоокисления	96
<i>Халил В.Б., Майтам Д.Н.</i> Исследование процесса десорбции углекислого газа с использованием клапанной тарелки новой конструкции	100
<i>Спиридонов А.В., Якубовский С.Ф., Зильбергейт М.А.</i> Поддержка управления химико-технологическим процессом в условиях неопределенности	105
<i>Майтам Д.Н.</i> Сопоставительный анализ изменения гидравлического сопротивления клапанной тарелки новой конструкции	110
<i>Ющенко В.Д., Галузо А.В., Куприянчик Т.С.</i> Анализ работы сооружений для удаления соединений фосфора из сточных вод на станции аэрации города Витебска	115