

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тверской государственный технический университет»

*Посвящается
40-летию
издания сборника*

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ, ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Межвузовский сборник научных трудов
Выпуск 7

Рецензируемое издание

Тверь 2014

УДК 621.891
ББК 22.251я43

Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. Вып. 7. Тверь: ТвГТУ, 2014. 272 с.

В сборник включены статьи теоретического и прикладного характера, посвященные широкому кругу вопросов, касающихся физических, химических, механических процессов на поверхности и в контакте твердых тел, а также деталей машиностроительных и энергетических машин и оборудования.

Отдельный раздел посвящен триботехническим аспектам проектирования, изготовления и эксплуатации современных технических устройств.

Представлены также работы, в которых предлагаются пути повышения надежности и эффективности машиностроительного, энергетического и транспортного оборудования, физические аспекты материаловедения.

Предназначен для научных и инженерно-технических работников, докторантов, аспирантов, студентов.

Подготовлен на кафедре прикладной физики Тверского государственного технического университета.

Редакционная коллегия:

доктор техн. наук профессор А.Н. Болотов;
доктор техн. наук профессор Г.Б. Бурдо;
академик РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор И.Г. Горячева;
доктор техн. наук профессор В.В. Измайлов (отв. редактор);
доктор техн. наук профессор В.В. Мешков;
канд. техн. наук доцент М.В. Новоселова (отв. секретарь).

Рецензенты: зав. кафедрой общей физики ТвГУ, доктор хим. наук, профессор Орлов Ю.Д.; доцент кафедры общей физики ТвГУ кандидат физ.-мат. наук Новоселов А.Р.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сорок лет назад, в 1974 году, на кафедре физики Калининского политехнического института был подготовлен и выпущен в свет сборник научных статей «Надежность и долговечность деталей машин» под редакцией Н.Б. Демкина. С тех пор многое изменилось – название города, ВУЗа, кафедры и самого издания, тем не менее нынешнее, сороковое по счету издание, как и все предыдущие, по праву можно считать продолжением того первого выпуска.

Неизменно основной тематикой сборника является механика и физика фрикционного контакта – научное направление, созданное основателем Тверской научной школы в области трибологии Н.Б. Демкиным. С годами тематика сборника расширилась, появились разделы, посвященные материаловедению, электрическим контактам, физике поверхности, научным основам проектирования, изготовления и эксплуатации технических устройств.

География участников сборника – от Брянска до Красноярска и от Ставрополя до С.-Петербурга. Публиковались в сборнике и зарубежные ученые из Канады и Чехии. Авторы статей представляют высшие учебные заведения, академические и научно-исследовательские институты, научно-производственные объединения и промышленные предприятия, в том числе МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, СПбГПУ, ИПмех РАН, ИМАШ РАН, ИММС НАНБ, НПО им. С.А. Лавочкина и др. В сборнике публиковались такие мировые авторитеты в области трибологии, как С.Б. Айнбиндер, Н.А. Буше, И.Г. Горячева, И.В. Крагельский, Н.К. Мышкин, А.П. Семенов, А.В. Чичинадзе и др. В то же время среди авторов присутствует и молодое поколение – студенты и аспиранты.

Материалы сборника отражаются в информационных базах научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU и входят в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Тематика данного выпуска сборника отражает основные направления научных исследований сотрудников Тверского государственного технического университета в области механики и физики контактного взаимодействия, триботехники, материаловедения, надежности и эффективности современного оборудования машиностроения.

Статьи в сборнике расположены по тематическим разделам и размещены в порядке их поступления в редколлегию.

Публикуемые материалы предназначены для научных работников и специалистов в области проектирования и эксплуатации современного машиностроительного, энергетического, транспортного оборудования, а также для докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов машиностроительных, энергетических и приборостроительных специальностей.

УДК 531.43

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, М.П. Вильмс
Тверской государственной технической университет**ФРИКЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ
КОНТАКТЕ С ТОНКИМИ ПЛЕНКАМИ ЖИРНЫХ КИСЛОТ
НА ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ**

Экспериментально определены значения коэффициента трения в единичном контакте шар – плоскость при малых нагрузках (0,5...5 мН). Материал контактирующих тел – сталь. На поверхность плоской детали наносили тонкие пленки жирных кислот. Для сравнения исследован контакт поверхностей без пленок жирных кислот. Определены параметры удельной силы трения τ_0 и β по И.В. Крагельскому. Показано, что при малых нагрузках в отсутствии пленок жирных кислот необходимо учитывать адгезионное взаимодействие контактирующих тел.

Ключевые слова: единичный контакт, коэффициент трения, удельная сила трения, жирные кислоты, адгезионное взаимодействие.

**FRICIONAL INTERACTION IN METAL CONTACT WITH THIN FATTY
ACIDS FILMS ON CONTACT SURFACES**

The friction coefficient values in single ball – plane contact have been measured experimentally under small normal loads (0,5...5 mN). Contact parts were made of steel. Thin fatty acid films were layered on flat contact part. The specific friction force parameters τ_0 and β according to I.V. Kragelsky have been obtained. As is shown, adhesive interaction of contacting bodies have to be taken into account in case of contact under small load without fatty acid film.

Keywords: single contact, friction coefficient, specific friction force, fatty acid, adhesive interaction.

Статья продолжает серию публикаций авторов по результатам исследования фрикционного взаимодействия в металлическом контакте при малых нагрузках [1–3].

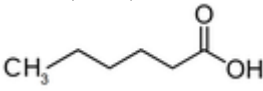
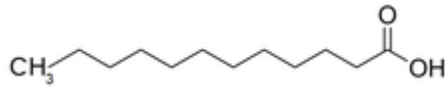
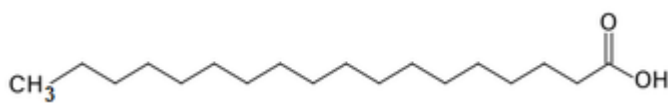
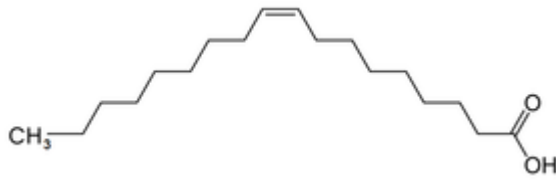
Одной из основных тенденций современной техники является миниатюризация и микроминиатюризация технических устройств, сочетающих в себе, как правило, механические и электрические компоненты. Такие устройства неизбежно содержат в своем составе различного рода неподвижные и скользящие контактные соединения, работающие при малых механических и электрических нагрузках. Контактное взаимодействие при малых нагрузках имеет свои характерные особенности, к числу которых относятся существенное влияние адгезионных сил и субшероховатости контактирующих поверхностей (неровностей наномасштабного уровня). В статье описываются результаты экспериментов по исследова-

нию влияния адгезионного взаимодействия на фрикционные характеристики металлического контакта при малых нагрузках.

1. Образцы и методика эксперимента. Эксперименты проводились на микротрибометре [2]. Контактная пара шар – плоскость представляет собой модель единичного контакта шероховатых технических поверхностей. Материал контактирующих деталей – сталь. Диаметр шарового образца 1 мм. Плоский образец представляет собой рабочую поверхность концевой меры длины. Шероховатость образцов соответствует 13–14-му классам, твердость образцов не менее 8 ГПа.

На поверхность плоского образца наносили тонкие пленки жирных кислот с различной длиной углеродной цепи (табл. 1). Часть экспериментов выполнялась без нанесения пленок.

Таблица 1. Исследованные жирные кислоты

Название кислоты	Кол-во атомов углерода в молекуле	Относительная молекулярная масса M	Химическая формула и схематическое строение молекулы
Капроновая	6	116	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{COOH}$ 
Лауриновая	12	200	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{10}-\text{COOH}$ 
Стеариновая	18	284	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$ 
Олеиновая	18	282	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$ 

Капроновая, лауриновая и стеариновая кислоты относятся к насыщенным и имеют линейную молекулу, олеиновая кислота относится к мононенасыщенным и имеет примерно в середине молекулы двойную связь. Молекула олеиновой кислоты в месте расположения двойной связи имеет изгиб под углом 120° .

Перед нанесением пленки на поверхность образца контактирующие поверхности очищали в такой последовательности: спиртом (полярным

растворителем), ацетоном (неполярным растворителем), активированной угольной пылью с помощью хлопчатобумажной ткани [4].

В настоящее время в мире публикуется много работ, посвященных исследованию мономолекулярных слоев на поверхности твердого тела – т.н. пленок (слоев) Ленгмюра – Блоджет [5–7]. Методика получения таких слоев хорошо отработана. Вместе с тем, еще П.А. Ребиндер [8] отмечал, что, в отличие от поверхности жидкости, на реальных металлических поверхностях при наличии активных центров, шероховатости (от себя добавим – и субшероховатости) и других дефектов трудно рассчитывать на однородность пленки. Кроме того, на практике смазка поступает на поверхность деталей почти всегда в избытке.

В данных исследованиях тонкая пленка жирной кислоты наносилась на поверхность стального полированного образца методом сливания растворов [4]. В качестве растворителя использовали бензол, который хорошо растворяет кислоты, перечисленные в табл. 1. В результате стекания раствора исследуемой кислоты и испарения легколетучего растворителя на поверхности пластинки оставался слой молекул кислоты.

2. Теоретические предпосылки. Для характеристики фрикционных свойств исследованных контактов, помимо экспериментально измеренных значений коэффициента трения, необходим еще целый ряд параметров. В первую очередь речь идет о таких величинах, как фактическое контактное давление и удельная сила трения (сдвиговая прочность фрикционного контакта), а также ее параметрах τ_0 и β по И.В. Крагельскому [9]. Для расчета этих характеристик использовали описанные ниже теоретические зависимости.

Для установления характера деформации контактирующих тел в условиях эксперимента проверяли выполнение условия $N_{max} < N_{кр}$, где N_{max} – максимальная нормальная нагрузка на шаровой образец в ходе экспериментов; $N_{кр}$ – критическое значение нагрузки, при которой в материале под поверхностью контакта зарождается пластическая деформация [10]:

$$N_{кр} = \frac{H^3 R^2}{E^{*2}}, \quad (1)$$

где H – микротвердость более мягкой детали; R – радиус шарового образца; E^* – приведенный модуль упругости, $E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$. В описываемых экспериментах $H = 8$ ГПа; $R = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м; $E^* = 10^{11}$ Па, откуда $N_{кр} \approx 13$ Н, что намного больше максимальной нагрузки $N_{max} = 5 \cdot 10^{-3}$ Н.

В условиях упругого контактирования радиус контактной площадки рассчитывается по известной формуле Герца

$$a_H = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{NR}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

соответственно, фактическое контактное давление

$$p_{rH} = \frac{N}{\pi a_H^2}. \quad (3)$$

С помощью рассчитанных значений фактического контактного давления и измеренных экспериментально значений коэффициента трения f можно рассчитать значения удельной силы трения

$$\tau_H = f p_{rH}. \quad (4)$$

Оценка роли адгезии в контактном взаимодействии возможна на основании той или иной теории адгезионного взаимодействия контактирующих тел. Наиболее известны и наиболее часто используются теории Джонсона – Кендалла – Робертса (*JKR*-теория) и Дерягина – Муллера – Топорова (*DMT*-теория). Считается, что для контактирующих тел с малым модулем упругости, значительной поверхностной энергией и большим радиусом кривизны предпочтительней *JKR*-теория. Для жестких тел малых размеров с малой поверхностной энергией рекомендуется *DMT*-теория [10, 11]. Д. Тейбором предложен безразмерный критерий для выбора предпочтительной теории:

$$\mu_T = \left(\frac{R\gamma^2}{E^{*2}z_0^3} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

где γ – поверхностная энергия; z_0 – равновесное межатомное расстояние в потенциале Леннард-Джонса.

При значениях $\mu_T < 1$ рекомендуется использовать *DMT*-теорию, при $\mu_T \gg 1$ – *JKR*-теорию [13]. При значениях $R = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, $E^* = 10^{11}$ Па, соответствующих условиям эксперимента, и типичном значении $z_0 \approx 0,4$ нм получаем значения критерия Д. Тейбора в зависимости от величины поверхностной энергии (табл. 2). Значения $\gamma \sim 1$ Дж/м² характерны для металлических поверхностей, поэтому, казалось бы, выбор должен быть сделан в пользу *JKR*-теории. В дальнейшем этот вопрос обсудим подробнее.

Таблица 2. Значения критерия μ_T

$\gamma, \text{Дж/м}^2$	0,01	0,1	1,0
μ_T	0,43	1,98	9,21

В *JKR*-теории радиус контактной площадки рассчитывается по формуле [11, 12]

$$a_{JKR} = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{R}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \left(N + 3\pi\gamma R + (6\pi\gamma R N + (3\pi\gamma R)^2)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (6)$$

В отсутствии адгезионного взаимодействия ($\gamma = 0$) формула (6) переходит в формулу (2) (теория Герца).

В *DMT*-теории радиус контактной площадки рассчитывается по формуле [12]

$$a_{DMT} = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{R}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}} (N + 2\pi\gamma R)^{\frac{1}{3}}, \quad (7)$$

которая также переходит в формулу (2) при $\gamma = 0$.

Величина фактического контактного давления с учетом адгезионного взаимодействия по указанным теориям рассчитывается аналогично формуле (3) с заменой a_H на a_{JKR} или a_{DMT} .

3. О величине поверхностной энергии в расчетах контактного взаимодействия. Для расчетов параметров контакта с учетом адгезионного взаимодействия необходимо располагать значением поверхностной энергии γ (формулы (5) – (7)).

Величина γ представляет собой работу адгезионных сил, необходимую для разрыва контакта, отнесенную к единице площади (т.е. работу, необходимую для образования двух новых неконтактирующих поверхностей единичной площади). В общем случае она рассчитывается по формуле $\gamma = k(\gamma_1 + \gamma_2) - \gamma_{12}$, где $k \leq 1$ – коэффициент, учитывающий рассогласование кристаллических решеток; γ_1, γ_2 – удельные поверхностные энергии материалов контактирующих поверхностей; γ_{12} – межфазная удельная энергия. Для одинаковых материалов с идеально совпадающими кристаллическими решетками $\gamma_{12} = 0$, $\gamma_1 = \gamma_2$, $k = 1$ и $\gamma = 2\gamma_1$. Для металлических поверхностей типичные значения $\gamma_1 = 1...3$ Дж/м², в частности для стали (железа) $\gamma_1 = 1,5...2,4$ Дж/м² [11, 13]. Но это справедливо, подчеркнем, для контакта атомарно чистых поверхностей (т.е. когда адгезия обусловлена металлическими связями), находящихся в непосредственном контакте (т.е. на расстоянии порядка 0,3...0,5 нм) с совпадающими кристаллическими решетками. В описываемых экспериментах эти условия, очевидно, не выполняются. Действие металлических связей ослабляется неизбежно присутствующими на поверхности адсорбированными пленками. Очевидно также, что $\gamma_{12} \neq 0$. По этим и некоторым другим причинам значение $\gamma = 3...5$ Дж/м² следует рассматривать как верхнюю оценку величины поверхностной энергии в исследованном контакте.

Для Ван-дер-Ваальсовых сил характерным значением является $\gamma_1 = 0,01$ Дж/м², что можно рассматривать как нижнюю оценку величины поверхностной энергии в исследованном контакте.

В работе [14] с учетом приведенных выше факторов для расчетов контактного взаимодействия металлических поверхностей принято значение $\gamma = 0,25$ Дж/м². Будем в дальнейших расчетах в основном ориентироваться на это значение. Как следует из дальнейшего анализа наших экспериментальных результатов, такое решение представляется вполне разумным.

4. Результаты экспериментов и их анализ.

4.1. Коэффициент трения в зависимости от нагрузки и длины молекулы жирных кислот. Экспериментально определенные значения коэффициента трения в исследованном контакте при различных нагрузках на шаровой образец в зависимости от относительной молекулярной массы кислот представлены на рис. 1. Молекулярная масса рассматривается как мера длины молекул жирных кислот. С ростом нагрузки коэффициент трения уменьшается. В отличие от известных результатов В. Гарди [4], кото-

рый для жирных кислот наблюдал монотонное снижение коэффициента трения в зависимости от молекулярной массы, в наших экспериментах эта зависимость немонотонная. Правда, в исследованиях Гарди молекулярные массы кислот ограничены значением $M = 200$. Кроме того, им исследовалась пара трения стеклянный сферический образец по плоской стеклянной пластине.

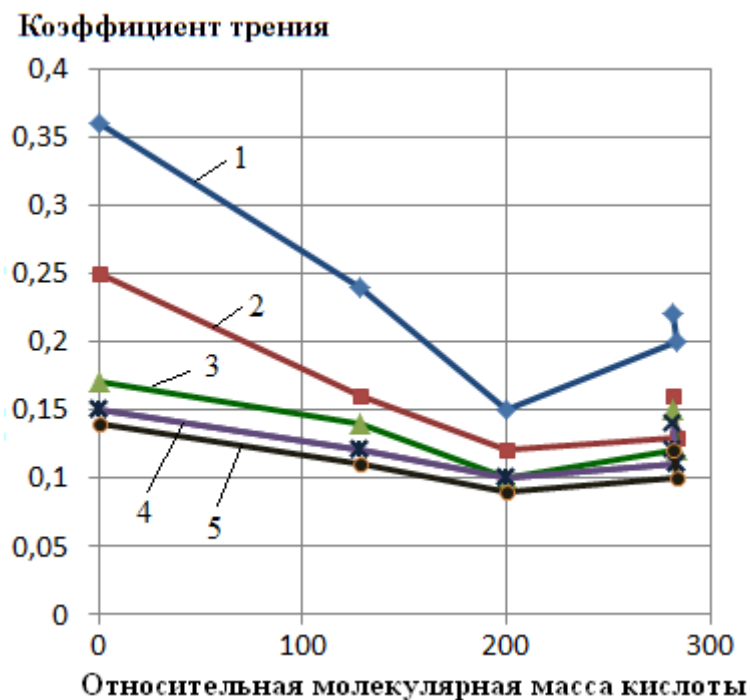


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от молекулярной массы кислоты при нагрузках в контакте: 1 – 0,5 мН; 2 – 1 мН; 3 – 2 мН; 4 – 3 мН; 5 – 5 мН

В опытах Боудена и Тейбора [4] со стальной парой трения и жирными кислотами в качестве смазки при молекулярной массе кислот $M > 100$ коэффициент трения постоянный, что также расходится с нашими результатами, особенно в области малых нагрузок.

Значения коэффициентов трения в наших экспериментах близки к результатам Боудена и Тейбора при относительно больших нагрузках ($f \sim 0,1$), но превосходят их при малых нагрузках ($f \sim 0,15 \dots 0,25$ в наших экспериментах против $f \sim 0,1$ у Боудена и Тейбора).

В работе [15] приведены зависимости коэффициента трения от нагрузки для контакта поверхностей, покрытых монослоями Ленгмюра – Блоджет, в том числе стеариновой и лауриновой кислот. Значения коэффициентов трения для пленок этих кислот отличаются незначительно, но в целом можно считать, что в контакте с пленкой стеариновой кислоты коэффициент трения несколько выше, чем в контакте с пленкой лауриновой кислоты, что согласуется с рис. 1.

4.2. Зависимость удельной силы трения от фактического контактного давления. Данная зависимость приведена на рис. 2 для различ-

ных условий контактирования в предположении герцевского контакта (формулы (2) и (3)). Обращает на себя внимание зависимость для контакта стальных поверхностей без нанесенных пленок жирных кислот (рис. 2а). Величина β в данном случае отрицательна, т.е. прочность адгезионных связей уменьшается с ростом фактического контактного давления, а не растет, как принято считать. Для контактных пар с пленками жирных кислот величина β положительна, но в контакте с пленкой капроновой кислоты зависимость удельной силы трения от фактического давления очень слабая (величина β менее 0,01).

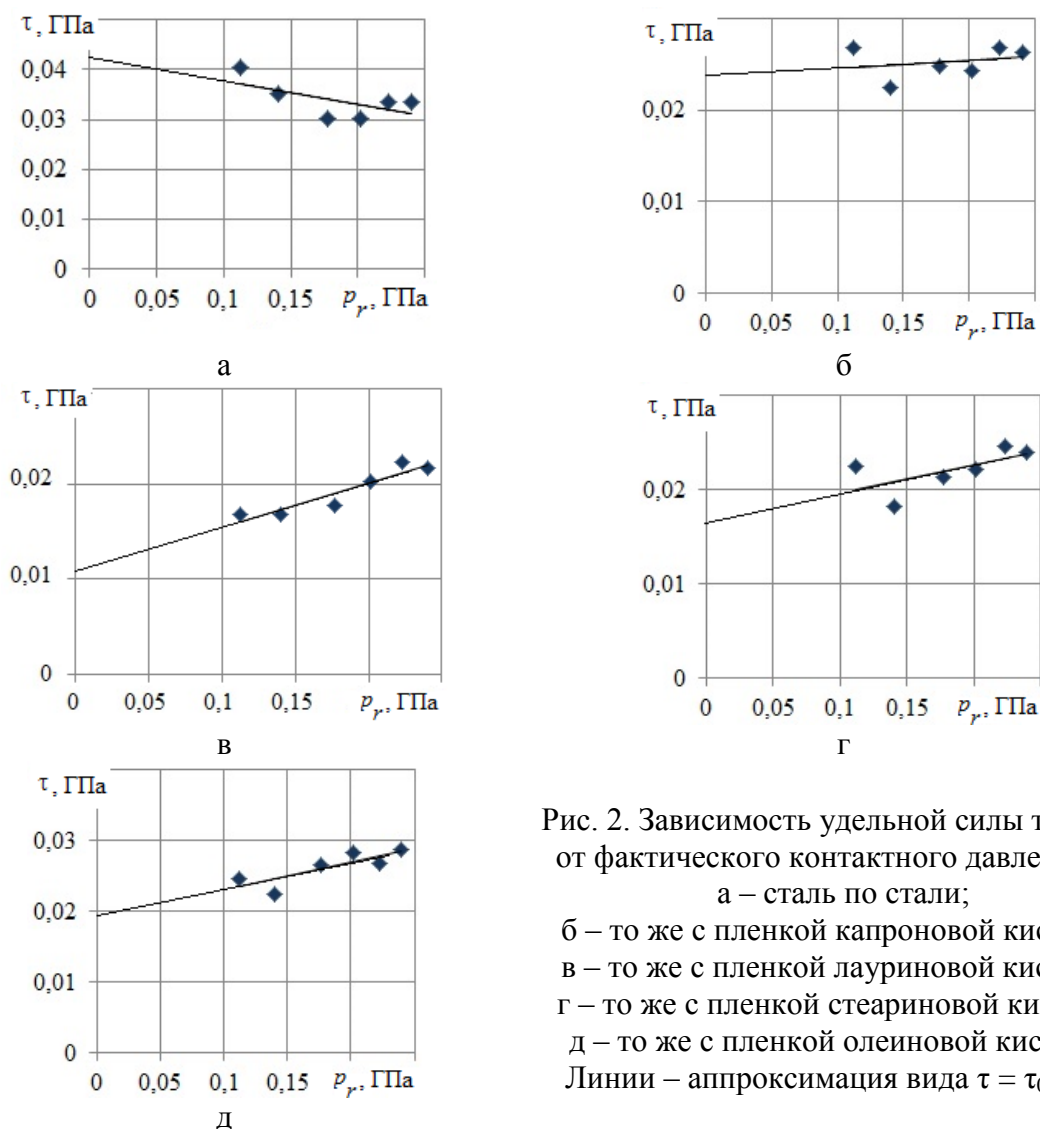


Рис. 2. Зависимость удельной силы трения τ от фактического контактного давления p_r :
 а – сталь по стали;
 б – то же с пленкой капроновой кислоты;
 в – то же с пленкой лауриновой кислоты;
 г – то же с пленкой стеариновой кислоты;
 д – то же с пленкой олеиновой кислоты.
 Линии – аппроксимация вида $\tau = \tau_0 + \beta p_r$

Причиной аномального характера зависимости $\tau(p_r)$ для поверхностей без нанесенных пленок жирных кислот может быть адгезионное взаимодействие. В контакте без специально нанесенных пленок оно выражено сильнее всего, хотя и ослаблено по сравнению с контактом атомарно чистых поверхностей. В случае капроновой кислоты (относительно малая длина молекулы) адгезионное взаимодействие металлов еще более ослаб-

лено, хотя и остается ощутимым. Наконец, относительно длинные молекулы высших жирных кислот (лауриновая и стеариновая) практически полностью экранируют металлические связи и адгезионное взаимодействие происходит между неполярными концевыми метильными группами CH_3 молекул кислот в соседних слоях. Границы соседних слоев в этом случае выступают в качестве плоскостей легкого скольжения, по которым происходит скольжение при приложении сдвигающего усилия. Межмолекулярное взаимодействие в этом случае происходит за счет сил Ван-дер-Ваальса.

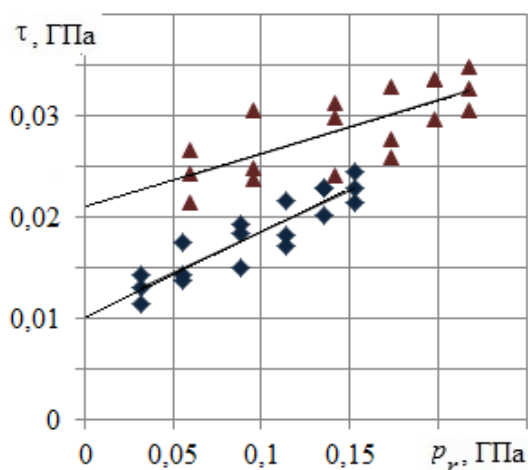


Рис. 3. Зависимость $\tau(p_r)$ для стальных поверхностей без пленок жирных кислот: \blacktriangle – по *DMT*-теории, \blacklozenge – по *JKR*-теории. Линии – аппроксимация

Учтем адгезионное взаимодействие в контакте без пленок жирных кислот с помощью формул (6) и (7). Значение поверхностной энергии согласно разделу 3 примем $\gamma = 0,25$ Дж/м². Результаты показаны на рис. 3. Линейная аппроксимация (рис. 3) дает следующие значения величин τ_0 и β (табл. 3). Аналогично были определены значения τ_0 и β при $\gamma = 3$ Дж/м², которые также приведены в табл. 3. По порядку величины значения τ_0 (табл. 3) при $\gamma = 0,25$ Дж/м² соответствуют имеющимся в литературе значениям для металлического контакта [9, 16]. По

абсолютному значению лучшее совпадение с литературными данными получается по *DMT*-теории. Так, в работе [16] в контакте стальных поверхностей при комнатной температуре $\tau_0 \approx 20$ МПа, в работе [9] для твердых металлов в паре со сталью $\tau_0 \sim 20 \dots 30$ МПа, в работе [17] в контакте одноименных металлов $\tau_0 \sim 10 \dots 40$ МПа. Следует, однако, заметить, что все эти данные получены при больших контактных нагрузках в условиях пластической деформации контакта, т.е. совсем в других условиях, нежели в наших экспериментах. Значения τ_0 , рассчитанные аналогичным образом при $\gamma = 3$ Дж/м², получаются примерно на порядок заниженными по сравнению с литературными данными. Значения β из табл. 3 во всех случаях по порядку величины соответствуют литературным данным.

Таблица 3. Значения τ_0 и β по теориям Герца, *DMT* и *JKR*

γ , Дж/м ²	Теория Герца		<i>DMT</i> -теория		<i>JKR</i> -теория	
	τ_0 , МПа	β	τ_0 , МПа	β	τ_0 , МПа	β
0,25	49,3	-0,064	21,0	0,053	10,4	0,082
3,0			2,0	0,120	4,2	0,117

Таким образом, учет адгезионного взаимодействия в исследованном контакте с помощью теории Дерягина – Муллера – Топорова при значении поверхностной энергии $\gamma \sim 0,25 \text{ Дж/м}^2$ позволяет получить значения параметра τ_0 удельной силы трения, наилучшим образом согласующиеся с известными значениями.

В заключение оценим значения удельной силы трения поверхностей с адсорбированными молекулами высших жирных кислот. В этом случае при сдвиге происходит разрушение молекулярных связей между соседни-

Таблица 4. Значения параметров удельной силы трения для высших жирных кислот

Название кислоты	τ_0 , МПа	β
Лауриновая	11	0,046
Стеариновая	17	0,030
Олеиновая	19	0,040

ми слоями жирных кислот, а не между металлическими поверхностями, взаимодействие которых экранировано пленками кислот. Примем оценочные значения [15] $\gamma \sim 5 \dots 10 \text{ мДж/м}^2$, $d \sim 0,5 \text{ нм}$, где d – диаметр молекулы. Тогда, следуя [18], получим $\tau \sim \gamma/d \sim 10 \dots 20 \text{ МПа}$, что хорошо согласуется с результатами наших экспериментов (табл. 4).

Заключение. Проведенные экспериментальные исследования единичного контакта шар – плоскость при малых контактных нагрузках при наличии и в отсутствии пленок жирных кислот на поверхности контактирующих тел показали следующее.

Наименьшие значения коэффициента трения стальных поверхностей с поверхностными пленками жирных кислот в ряду $n = 6 \dots 18$ (n – число атомов в молекуле кислоты) наблюдаются для пленок лауриновой кислоты ($n = 12$).

В случае контакта металлических поверхностей без специально нанесенных поверхностных пленок при малых контактных нагрузках в расчетах параметров фрикционного контакта – таких, как радиус площадки контакта; фактическое контактное давление; удельная сила трения – следует учитывать адгезионное взаимодействие между контактирующими телами. В наших экспериментах лучшие результаты дало применение теории Дерягина – Муллера – Топорова по сравнению с теорией Джонсона – Кендалла – Робертса.

В контакте стальных поверхностей с пленками высших жирных кислот их присутствие на поверхности контакта экранирует взаимодействие контактирующих тел, и влияние адгезионных сил становится несущественным. Расчет параметров контакта в этом случае можно вести в соответствии с теорией Герца.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-00159-а).

Библиографический список

1. Измайлов, В.В. Исследование трения металлов на микроструктурном уровне в условиях граничной смазки / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, М.П. Вильмс // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2012. Вып. 5. С. 49-52.
2. Измайлов, В.В. Адгезионное взаимодействие металлов в условиях трения покоя на микромасштабном уровне / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, Д.А. Гусев // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 9. С. 40-46.
3. Измайлов, В.В. Исследование адгезионного взаимодействия стальных поверхностей с учетом субшероховатости / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2013. Вып. 6. С. 36-42.
4. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
5. Petty, M.C. Langmuir – Blodgett films: an introduction / M.C. Petty. Cambridge University Press, 1996.
6. Hussain, S.A. Langmuir – Blodgett films and molecular electronics / S.A. Hussain, D. Bhattacharjee // Modern Physics Letters B. 2009. V. 23. № 27. P. 1-15.
7. Голоудина, С.И. Технология Ленгмюра – Блоджетт / С.И. Голоудина, В.В. Лучинин // Журнал прикладной химии. 2005. Т. 78. Вып. 9. С. 1499-1503.
8. Ребиндер, П.А. Влияние поверхностно-активной среды на граничное трение и износ / П.А. Ребиндер, Г.И. Елифанов // Развитие теории трения и изнашивания. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1957. С. 47-56.
9. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
10. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.
11. Попов, В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В.Л. Попов. М.: Физматлит, 2013. 352 с.
12. Xinghua Shi. Comparison of various adhesion contact theories and the influence of dimensionless load parameter / Shi Xinghua, Ya-Pu Zhao // J. Adhesion Sci. Technol. 2004. V. 18. № 1. P. 55-68.
13. Свириденко, А.И. Механика дискретного фрикционного контакта / А.И. Свириденко, С.А. Чижик, М.И. Петроковец. Мн.: Навука і тэхніка. 1990. 272 с.
14. Morrow, C.A. Adhesive rough surface contact: PhD Thesis / C.A. Morrow. University of Pittsburg, 2003. 84 p.
15. Абрамзон, А.А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение / А.А. Абрамзон. Л.: Химия, 1981. 304 с.
16. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л.Ш. Шустер. Уфа: Издательство «Гилем», 1999. 199 с.
17. Измайлов, В.В. О теориях трения / В.В. Измайлов // Физико-механические процессы в зоне контакта деталей машин: межвуз. науч. сб. Калинин: КГУ, 1983. С. 3-19.
18. Дедков, Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели / Г.В. Дедков // У.Ф.Н. 2000. Т. 170. № 6. С. 585-618.

УДК 620.178:677.042

В.М. Сербин
Северо-Кавказский Федеральный Университет

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЗИН С АБРАЗИВОМ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Изучены триботехнические характеристики резин на основе каучуков общего назначения при трении по закрепленному абразиву и наличии водной среды. Показано, что основным фактором, определяющим износостойкость полимеров в этих условиях, является тип каучука. Установлено значительное влияние на износ резин механо-химических процессов в трибосопряжении.

Ключевые слова: резина, износ, износостойкость.

FEATURES OF CONTACT INTERACTION OF RUBBERS WITH THE ABRASIVE IN THE WATER ENVIRONMENT

Triboengineering characteristics of rubbers made on the basis of all-purpose raw rubbers at a friction against the fixed abrasive in water environment are studied. It is shown that the raw rubber type is a major factor defining wear resistance of elastomers in these conditions. Considerable influence of mechanochemical processes in tribocouples on rubber wear has been established.

Keywords: rubber, wear, wear resistance.

В предыдущем сообщении [1] были рассмотрены результаты исследования триботехнических характеристик резины марки ИРП-10214, которая по результатам стендовых и натурных испытаний разнородных материалов (металлы, полимеры, эластомеры) показала максимальную износостойкость [2]. Однако эти исследования носили большей частью методический характер, и их целью было обнаружение общих тенденций при изнашивании эластомеров о закрепленный абразив в присутствии водной среды. Поэтому для установления более глубоких закономерностей абразивного изнашивания резин в водной среде и получения более достоверной информации по материаловедческому аспекту затронутой проблемы были проведены дополнительные экспериментальные исследования, результаты и практическое применение которых рассматриваются в настоящей работе.

Методика экспериментальных исследований. Триботехнические испытания проводились на лабораторной установке (рис. 1) [3].

В состав установки входят: машина трения торцового типа 1, термостат для жидкой среды 2 и приводная станция 3. Машина трения состоит из несущей колонны 4, жестко закрепленной на основании 5. На колонне установлена подшипниковая опора 6 и связанный с ней кольцевой сосуд 7, приводимый во вращение клиноременной передачей 8. Внутри кольцевого сосуда размещено контртело – шлифовальный круг 9, взаимодействующий с узлом трения 10, закрепленным на поперечине 11. На поперечине размещено также нагружающее устройство, включающее стойку 12, рычаг 13, гибкую подвеску 14 и набор грузов 15. Гибкая подвеска понижает инерционность поворотной системы, а

упорные подшипники 16 уменьшают потери на трение. Вертикальному смещению этой системы препятствует клемма 17, связанная с тензометрической балкой 18, которая взаимодействует со стойкой 12.

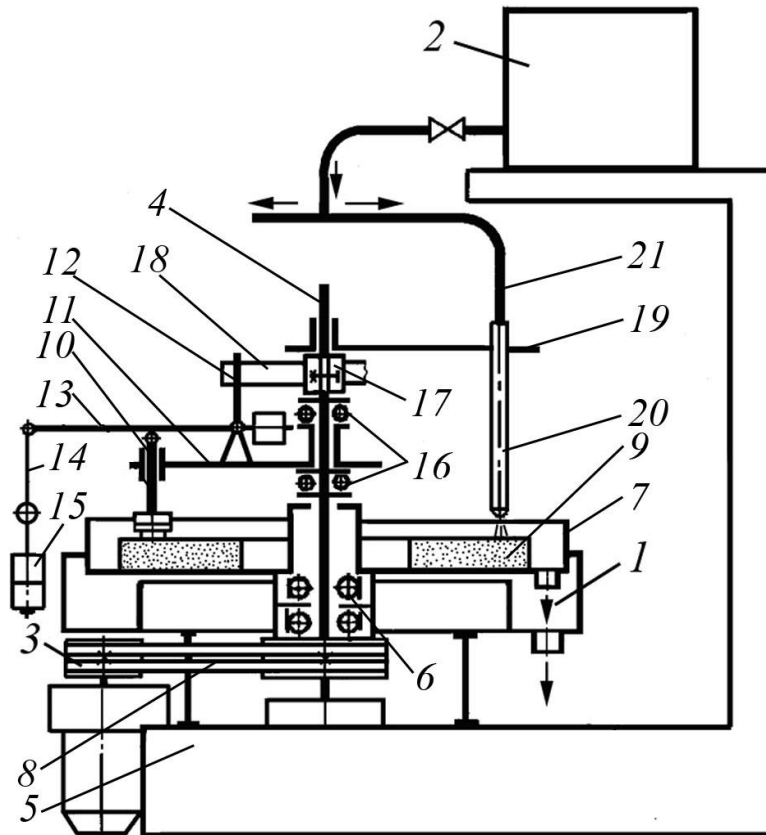


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Система подачи жидкой среды в зону трения включает дополнительную поперечину 19 и связанные с ней сопла 20, которые при помощи гибких шлангов 21 соединены с термостатом 2.

В качестве смазочно-охлаждающей среды использовалась водопроводная вода. Трение резиновых образцов осуществлялось о шлифовальный круг типа ПП450×50×350 24А, выполненный из белого электрокорунда твердостью по Моосу 9...10, зернистостью шлифзерна 0,33 мм и содержанием основной фракции 55%. Давление в трибосопряжении p изменялось от 0,05 до 0,5 МПа, скорость скольжения v – от 0,2 до 1,0 м/с, температура жидкой среды T – от 5 до 95°С. В процессе эксперимента фиксировались сила трения и температура в зоне трения. Износ эластомеров оценивался взвешиванием на аналитических весах с последующим пересчетом массового износа в линейную интенсивность изнашивания.

Для анализа продуктов износа был изготовлен экстракционный аппарат, включающий подогреватель, емкость с водой, колбу и притертую пробку с размещенным в ней обратным холодильником. Содержание ацетонового и хлороформенного экстракта в продуктах износа оценивалось по стандартной методике [4].

Известно, что помимо внешних факторов (нагрузка – скорость – температура) на износостойкость резин наиболее значительное влияние оказывает ее рецептурный состав. Резина – это многокомпонентный материал, содержащий в своем составе десятки ингредиентов. Однако, как показывают многочисленные исследования, основное влияние на износостойкость эластомеров оказывает тип каучука. Поэтому в качестве объектов испытания были выбраны резины на основе каучуков общего назначения: натурального (НК), изопренового (СКИ-3), бутадиен-стирольного (БСК) и бутадиенового (СКД). На основе этих каучуков были приготовлены модельные резиновые смеси следующего состава (мас. части): каучук – 100; сера – 1,7; оксид цинка – 5,0; стеарин – 1,0; технический углерод К354 – 65,0; неозон Д – 1,0; стирольно-инденная смола – 3,0; масло ПН-6 – 20,0; сульфенамид Ц – 0,5; воск – 2,0. За счет повышенного содержания масла ПН-6 удалось обеспечить удовлетворительные технологические свойства резиновой смеси на основе СКД.

Физико-механические характеристики экспериментальных резин приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические показатели экспериментальных резин

Показатели	Резиновая смесь на основе			
	БСК	НК	СКИ-3	СКД
Условная прочность при растяжении, МПа	22	19	22	10
Относительное удлинение при разрыве, %	447	590	660	390
Сопротивление раздиру, кН/м	84	62	92	47
Эластичность по отскоку, %	42	44	51	38
Твердость по Шору А, усл. ед.	58	58	50	66

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенные ранее испытания резины ИРП-10214 показали, что при нормальном скоростном и тепловом режиме основное влияние на ее износ оказывает давление в трибосопряжении. Поэтому на первом этапе исследования было изучено влияние этого фактора на износостойкость экспериментальных резин. На рис. 2 показаны результаты испытания при температуре жидкой среды $T = 20^{\circ}\text{C}$ и скорости скольжения резиновых образцов $v = 0,5$ м/с.

Из графика следует, что объекты испытания делятся на две группы. Первую составляют вулканизаты на основе НК и СКИ-3, а вторую – БСК и СКД. При этом интенсивность изнашивания резин, входящих в первую группу, значительно выше (особенно при повышенных давлениях), чем у резин второй группы.

Для установления причин этого явления была изучена структура поверхности трения экспериментальных резин, а также продукты их износа. Следует отметить, что анализ продуктов износа позволяет получить наиболее объективную и достоверную информацию о реальных физико-механических процессах, протекающих в тонких приповерхностных слоях трущихся тел, значительно отличающихся по свойствам и структуре. Сбор этих продуктов довольно сложный и трудоемкий процесс, однако в нашем эксперименте эта

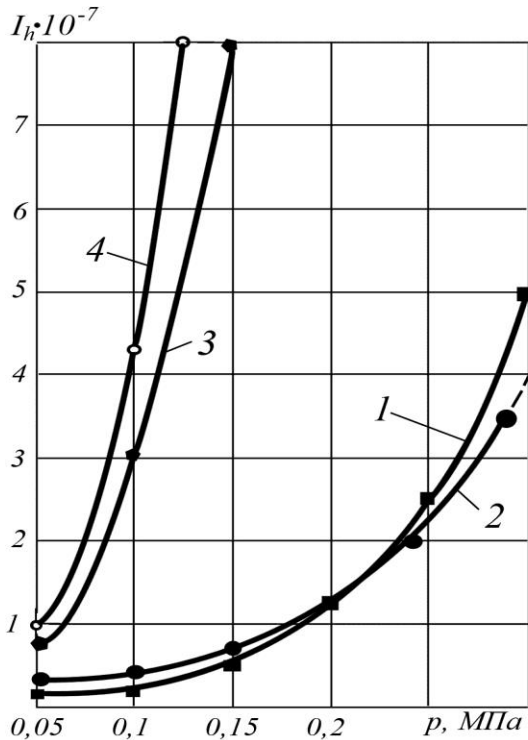


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания резин от нагрузки на основе каучуков: 1 – СКД; 2 – БСК; 3 – СКИ; 4 – НК

ской деструкции поверхность трения размягчалась и резина теряла упругие свойства. Согласно результатам исследования [1], это приводило к нарушению условий смазки и повышенному износу полимера.

задача была решена за счет смазочного действия жидкости, исключаяющего «засаливание» поверхности трения шлифовального круга.

Анализ поверхности трения резин первой группы (рис. 3а) показывает наличие рисунка Шалламаха, что свидетельствует о развитии интенсивного механизма изнашивания посредством «скатывания». При этом продукты изнашивания имели вид липкого субстрата, покрытого густой маслянистой жидкостью темного цвета. Все эти признаки свидетельствуют об интенсивной механохимической деструкции, которая развивалась в поверхностных слоях полимера. При этом термическая деструкция исключалась, так как испытания проводились при стабильной «комнатной» температуре воды – 20°C. Отсюда следует, что в результате механохимической

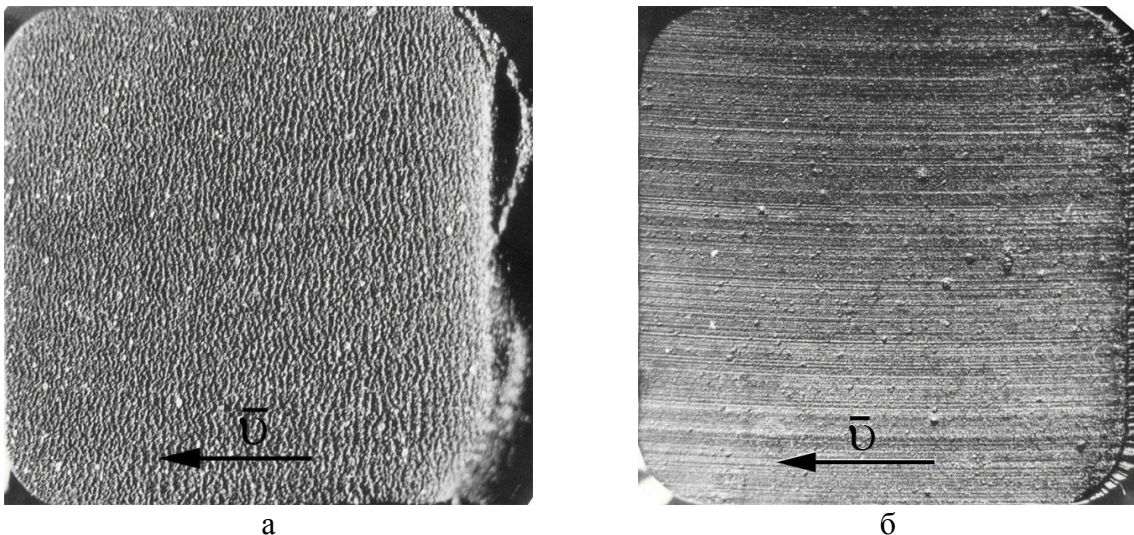


Рис. 3. Морфология поверхности трения резин первой (а) и второй (б) группы (4-кратное увеличение)

Что касается резин второй группы (рис. 3б), то рельеф поверхности трения кардинально отличается от резин первой группы. Эта поверхность является гладкой со следами небольших продольных борозд и углублений. Интен-

сивность изнашивания резин этой группы находится в пределах $10^{-7} \dots 10^{-8}$, а продукты износа имеют вид сухой мелкодисперсной крошки. Все эти признаки свидетельствуют о смешанном механизме изнашивания с преобладанием усталостного, а также об отсутствии или низкой интенсивности деструкционных процессов.

Дополнительное подтверждение сделанным выводам было получено в результате экстракции продуктов износа в ацетоне и хлороформе. Известно, что при помощи ацетона можно извлекать окисленные продукты деструкции, а при помощи хлороформа – продукты разрушения структурной сетки вулканизата. В процессе проведения эксперимента первоначально было определено содержание ацетонового и хлороформенного экстракта в исходной резине как основы для сравнительного анализа, а затем экстрагировались продукты износа всех резин, полученные при одинаковых условиях изнашивания ($p = 0,1$ МПа; $v = 0,5$ м/с; $T = 20^\circ\text{C}$). Результаты сравнительных испытаний представлены на диаграммах (рис. 4).

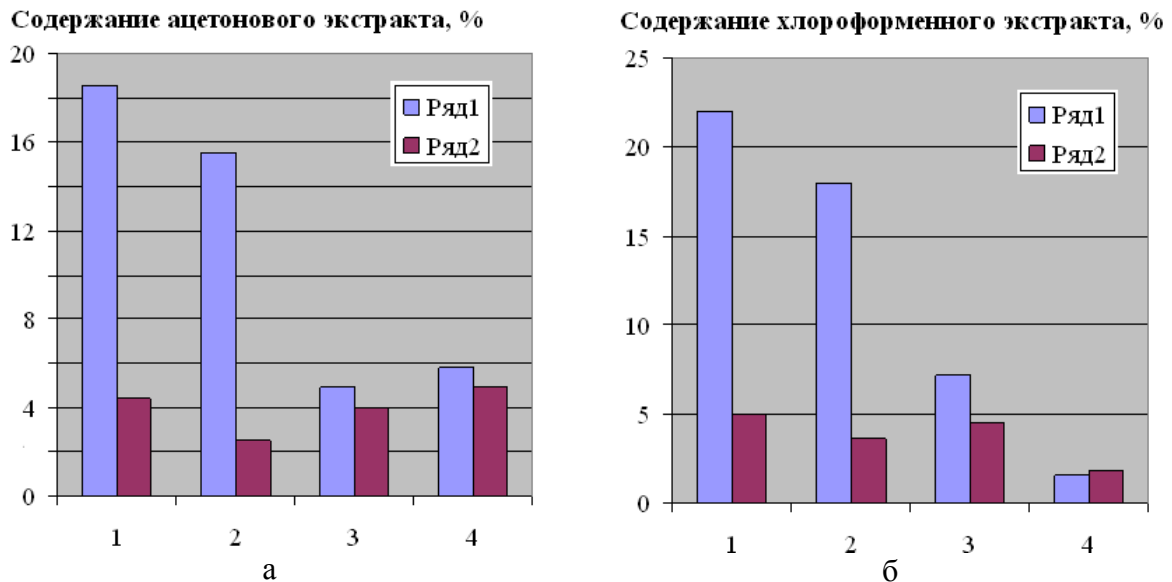


Рис. 4. Содержание ацетонового (а) и хлороформенного(б) экстракта в продуктах износа (ряд 1) и исходной резине (ряд 2) на основе: 1 – СКИ-3; 2 – НК; 3 – БСК; 4 – СКД

Анализ диаграмм показывает, что наибольшему разрушению в процессе изнашивания подверглись макромолекулы резин на основе СКИ-3 и НК. При этом имели место как окислительные процессы, так и разрушения вулканизационной сетки. В значительно меньшей степени воздействию этих негативных факторов подверглись резины на основе БСК и СКД.

Следует отметить, что механизм столь различного поведения полимеров до конца еще не раскрыт, хотя хорошо известно, что в процессе механической переработки сырые резиновые смеси на основе НК и СКИ легко поддаются пластикации, а на основе БСК и СКД деструкции практически не подвергаются. В.А. Каргин и Г.М. Слонимский [5] изменения свойств полимеров в поле сдвиговых механических напряжений (что характерно для трения) связывают

с изменением молекулярной массы и степени разветвленности цепей, вызванных, в свою очередь, разрывом молекулярных цепей и образованием свободных радикалов на концах разорванной цепи. По мнению авторов, возникновение радикалов вызывает ряд вторичных процессов (прежде всего, окислительных), приводящих к деструкции и структурированию полимера. Первый процесс приближает свойства полимера к свойствам жидкости, а второй – к свойствам твердого тела. Эта теория достаточно точно описывает процессы, наблюдаемые в наших экспериментах.

Таким образом, в условиях абразивного изнашивания и смазки водой установлено решающее влияние типа каучука и его структурной устойчивости на абразивную износостойкость эластомеров. Разумеется, и другие компоненты резиновой смеси (наполнители, вулканизаторы, мягчители, ускорители и т.д.) оказывают влияние на этот процесс. Однако определяющая роль каучука бесспорна. Интересно, что в рассматриваемых условиях не имеют большого значения физико-механические показатели испытываемых резин. По крайней мере, согласно данным, приведенным в табл. 1, самые низкие показатели по условной прочности при растяжении и сопротивлению раздиру имеет вулканизат на основе 100% СКД, износостойкость же этой резины самая высокая. Показатели БСК, НК и СКИ-3 соизмеримы, но износостойкость первой резины значительно выше.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в качестве основы для разработки износостойких эластомерных композиций можно рекомендовать регулярный цис-бутадиеновый каучук СКД-3. Известно, что при всех положительных качествах этот каучук обладает неудовлетворительными технологическими свойствами и поэтому чаще используется в комбинации с другими каучуками. Попытка использовать для этих целей комбинацию СКД+НК и СКД+СКИ-3 не увенчалась успехом. Эксперименты показали, что изопреновые каучуки даже при низком процентном содержании выступают в роли катализатора, инициирующего деструкционные процессы. Поэтому в рассматриваемых условиях нет альтернативы бутадиен-стирольному каучуку. В этой связи была изучена износостойкость полимеров, выполненных из ранее приведенной модельной резиновой смеси, в составе которой каучук БСК последовательно заменялся равными долями СКД (табл. 2).

Таблица 2. Физико-механические показатели опытных резин

Показатели	Соотношение каучуков БСК:СКД (мас. ч.)					
	100:0	80:20	60:40	40:60	20:80	0:100
Условная прочность при растяжении, МПа	22	20	17	16	12	10
Сопротивление раздиру, кН/м	84	83	78	72	65	47
Твердость по Шору А, усл. ед.	58	62	62	62	62	66
Относительное удлинение при разрыве, %	447	447	393	470	363	390
Эластичность по отскоку, %	22	28	30	32	38	38
Модуль упругости при 300%-м удлинении, МПа	6,2	7,3	8,2	7,7	7,23	5,8

Испытания образцов проводили при температуре жидкой среды $T = 20^\circ\text{C}$, скорости скольжения $v = 0,5$ м/с в диапазоне давлений $p = 0,05 \dots 0,25$ МПа. Результаты испытаний показаны на рис. 5.

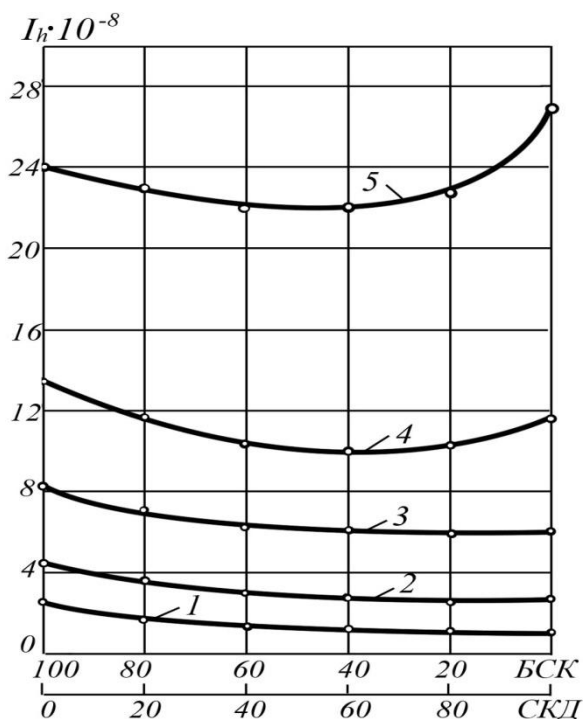


Рис. 5. Влияние соотношения каучуков (мас. ч.) на износ резин при давлении: 1 – 0,05 МПа; 2 – 0,1 МПа; 3 – 0,15 МПа; 4 – 0,20 МПа; 5 – 0,25 МПа

так и прочностные свойства резин. При пониженных давлениях на передний план выступает влияние пониженного коэффициента трения резин на основе СКД, а при повышенных давлениях превалирующим оказывается влияние более высоких прочностных характеристик резин на основе БСК (см. табл. 1).

Заключение. Таким образом, в условиях смазки водой повышенной износостойкостью будут обладать резины, сочетающие высокие прочностные и антифрикционные свойства. Этими качествами обладает, как показали наши исследования, резина, содержащая в своем составе комбинацию из 60 мас. ч. СКД и 40 мас. ч. БСК. Кроме того, указанная резиновая смесь обладает удовлетворительными технологическими свойствами – подвулканизация по Муни (ГОСТ 10722-76) снижается примерно на 37% по сравнению со смесью, содержащей 100% СКД.

Для проверки эффективности разработанной эластомерной композиции в ОАО «Резинотехник» (г. Черкесск) была изготовлена опытная партия резиновой футеровки для классификаторов типа КСН-20. По результатам опытно-промышленных испытаний в условиях ЗАО «Урупский ГОК» эта футеровка показала износостойкость на 30% выше, чем аналогичная футеровка, выполненная из эталонной резины ИРП-10214. Это позволило рекомендовать новую эластомерную композицию к использованию в серийном производстве при из-

Анализ графиков обнаруживает экстремальную зависимость интенсивности изнашивания то наличия обоих каучуков. Увеличение содержания СКД первоначально приводит к снижению износа, который достигает минимальных значений при соотношении СКД:БСК = 60:40. Дальнейшее увеличение содержания СКД приводит к росту интенсивности изнашивания эластомеров. Наиболее ярко это проявляется при давлениях от 0,15 МПа и выше. Причина этого явления, по нашему мнению, заключается в том, что при использовании смазочно-охлаждающей жидкости создаются условия для поддержания стабильной температуры в трибосопрежении, обеспечивающей устойчивость структуры полимера. В этих условиях решающее влияние на износ резин оказывают как фрикционные,

готовлении крупногабаритных резино-технических изделий, эксплуатируемых в водно-абразивных средах в различных отраслях промышленности.

Библиографический список

1. Сербин, В.М. Влияние водной среды на контактное взаимодействие эластомеров с закрепленным абразивом в условиях трения скольжения / В.М. Сербин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2011. Вып. 4. С. 84-90.
2. Пенкин, Н.С. Гуммированные детали машин / Н.С. Пенкин. М.: Машиностроение, 1977. 200 с.
3. Сербин, В.М. Многофункциональная лабораторная установка для испытания эластомеров на абразивное изнашивание / В.М. Сербин // Каучук и резина. 1999. № 2. С. 25-28.
4. Малышев, А.И. Анализ резин / А.И. Малышев, А.С. Помогайбо. М.: Химия, 1977. 232 с.
5. Каргин, В.А. Избранные труды. Проблемы науки о полимерах / В.А. Каргин. М.: Наука, 1986. 280 с.

УДК 662.731:543.5:621.891

И.И. Беркович, Ю.И. Морозова

Тверской государственной технической университет

СВЯЗЬ МЕЖДУ СИЛАМИ НАТЯЖЕНИЯ В ВЕТВЯХ НИТИ, ТКАНОЙ И СПЛОШНОЙ ЛЕНТ

Рассмотрен контакт нити, тканой и сплошной лент с цилиндрической направляющей поверхностью. Получены соотношения, связывающие силы натяжения в ветвях нитей и лент, различной степени сложности с учетом особенностей формирования фактической площади контакта.

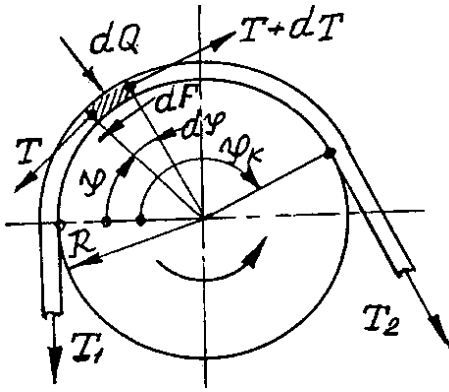
Ключевые слова: контакт, трение, нить, сплошная и тканая ленты, фактическая площадь контакта, сила натяжения.

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE TENSION FORCES IN THE STRANDS OF FIBER, WOVEN AND CONTINUOUS TAPE

A contact of fiber, woven or continuous tape with cylindrical track surface has been studied. The relationships between the tension forces in the strands of fibers or tapes of different degree of complexity with the account of features of the actual contact area formation have been obtained.

Keywords: contact, friction, fiber, continuous and woven tape, the actual contact area, the tension force.

В различных технологических процессах, связанных с переработкой волокнистых материалов, имеет место скольжение волокон по цилиндрическим направляющим поверхностям. Трение волокон о направляющую поверхность определяет силу натяжения и распределение нормального усилия, фактической площади контакта (ФПК) и линейного износа по дуге охвата. Существующие взгляды на процесс скольжения волокон как гибких связей не учитывают особенностей формирования ФПК, поэтому расчетные соотношения, типа



Расчетная схема

формулы Эйлера, не учитывают влияние на связь между силами натяжения в набегающей и сбегающей ветвях ряда параметров, в частности радиуса направляющей поверхности, диаметра волокна, упругой постоянной и др., хотя на опыте отмечено существование влияния этих параметров [1].

Для вывода формулы, связывающей силы натяжения в ветвях волокна, воспользуемся расчетной схемой, представленной на рисунке.

Стрелкой показано направление вращения цилиндра, при этом будем считать огибающее цилиндр волокно неподвижным, удерживаемым от движения силами натяжения. В соответствии с соотношением [2] сила трения, действующая на заштрихованный элемент волокна:

$$dF = \tau_0 dA_{\Gamma} + \beta dQ, \quad (1)$$

где τ_0 , β – молекулярные константы трения, dA_{Γ} – ФПК.

Из условия равновесия элемента

$$dQ \cong Td\varphi, \quad dF \cong dT. \quad (2)$$

Рассматривая совместно соотношения (1) и (2) [2], получаем дифференциальное уравнение типа уравнения Бернулли:

$$\frac{dT}{dT} = B_4 T^{1-0,5^i} + \beta T,$$

где $B_4 = (2K)^{2-0,5^{i-1}} (DR)^{0,5^i} \cdot \tau_0 \cdot \prod_1^i J_z^{0,5^z}$, i – порядок сложности волокна.

Решение этого уравнения дает связь между силами натяжения в набегающей и сбегающей ветвях волокна:

$$T_2 = \left[\left(\frac{B_4}{\beta} + T_1^{0,5^i} \right) \exp(0,5^i \beta \varphi_k) - \frac{B_4}{\beta} \right]^{2^i}. \quad (3)$$

Полная сила трения $F = T_2 - T_1$.

Погонное нормальное усилие с учетом (2), (3)

$$q_{\Pi} = \frac{dQ}{Rd\varphi} = \frac{T}{R} = R^{-1} \left[\left(\frac{B_4}{\beta} + T_1^{0,5^i} \right) \exp(0,5^i \beta \varphi_k) - \frac{B_4}{\beta} \right]^{2^i}. \quad (4)$$

Фактическая площадь контакта на единице длины волокна с учетом [2]

$$a_{\Gamma} = \frac{B_4}{\tau_0 R^{0,5^i} + 1} \left[\left(\frac{B_4}{\beta} + T_1^{0,5^i} \right) \exp(0,5^i \beta \varphi) - \frac{B_4}{\beta} \right]^{2^i}. \quad (5)$$

Погонная сила трения

$$f_{II} = \tau_0 a_T + \beta q_{II} = R^{-1} \left(\frac{B_4}{R^{0,5^i}} + \beta \right) \left[\left(\frac{B_4}{\beta} + T^{0,5^i} \right) \exp(0,5^i \beta \varphi) - \frac{B_4}{\beta} \right]. \quad (6)$$

Формулы (4)–(5) представляют собой законы распределения нормальной нагрузки, ФПК и силы трения по углу охвата. В отличие от формул, выведенных на основе представления о независимости коэффициента трения от нормальной нагрузки (закон Амонтона), эти соотношения так же, как и (3), учитывают реальные закономерности трения и формирования фактической площади контакта, а поэтому отражают влияние на перечисленные характеристики радиуса цилиндра, диаметра волокна, коэффициентов двучленного закона трения, упругой постоянной.

Здесь следует учесть, что в случае, если волокно имеет порядок сложности более 5-го, как это было показано в предыдущем разделе, фактическая площадь контакта становится пропорциональна нормальной нагрузке и соотношение (3) приводится к формуле Эйлера. Действительно, если $i \rightarrow \infty$, то $0,5^i \rightarrow 0$, и тогда

$$T_2 \cong T_1 \exp(\beta \varphi).$$

В этом случае формулы (4)–(6) принимают вид, соответствующий формуле Эйлера. Однако если волокно имеет низкий порядок сложности, а контртело обладает невысоким модулем упругости, то должны проявляться те закономерности, которые прогнозируются перечисленными соотношениями, в частности, нелинейность связи между силами натяжения и влияние радиуса направляющей поверхности на связь между силами натяжения [1].

Рассмотрим связь между силами натяжения в ветвях тканой ленты, скользящей по цилиндрической поверхности.

Воспользуемся выражением силы трения на элементарном участке, огибающем цилиндр тканой ленты, которое аналогично использованному уравнению для скольжения волокна по цилиндрической направляющей. Используем также равновесие этого элемента [2]:

$$dA_a = bRd\varphi.$$

Номинальная площадь контакта

$$dA_{ri} = B_5 dQ^\gamma dA_a^{1-\gamma}, \quad (7)$$

где b – ширина тканой ленты.

Выразим фактическую площадь контакта элемента:

$$dA_{ri} = B_5 dQ^\gamma dA_a^{1-\gamma}, \quad (8)$$

где B_5 – коэффициент [2].

Используя соотношения (7), (8) [2], получим:

$$dT/d\varphi = \tau_0 B_5 (Rb)^{1-\gamma} T^\gamma + \beta T = B_6 T^\gamma + \beta T. \quad (9)$$

Решение этого уравнения дает связь между силами натяжения в набегающей и сбегающей ветвях тканой ленты, скользящей по цилиндрической направляющей поверхности:

$$dA_{ri} = B_5 dQ^\gamma dA_a^{1-\gamma}. \quad (10)$$

Здесь

$$\gamma = 1 - 3^{-1} 0,5^{i-1}.$$

$$B_5 = \tau_0 (Rb/\Delta A_a)^{1-\gamma} 1,6^{2-0,5^{i-2}} (4,11)^{0,5^i} / [(k_T E_{ni})^{2(1-\gamma)^{i-1}} \prod_1^{i-1} E_{jn}^{0,5^j}].$$

Если показатель степени γ приближается к единице, то фактическая площадь контакта пропорциональна нормальной нагрузке. Коэффициент трения не зависит от последней (закон Амонтона), и соотношение (10) переходит в формулу Эйлера. Это возможно, если волокна имеют порядок сложности более четвертого. Кроме того, такое наблюдается, когда мала величина удельной адгезии.

Рассмотрим связь между силами натяжения в ветвях сплошной гибкой ленты с дисперсным покрытием. Сплошные ленты с дисперсным покрытием нашли широкое применение в технике и технологии обработки деталей. Примерами служат магнитные носители информации, шлифовальные ленты. В первом случае рабочая сторона имеет покрытие, включающее мелкодисперсные частицы ферромагнетиков. Шлифовальные ленты имеют покрытие, включающее абразивные частицы разной крупности. Микрогеометрия поверхности таких лент изучается теми же методами, что и твердых тел, а для описания микрогеометрии используются стандартные параметры. Рассмотрим контакт сплошной ленты с твердой поверхностью. В этом случае для расчета ФПК целесообразно воспользоваться формулой Н.Б. Демкина [3] для упругого контакта, полагая, что контурная площадь контакта равна номинальной:

$$A_r = \left(\frac{Q}{0,43 k_3 E_n} \right)^{\frac{2\nu}{2\nu+1}} \left[0,5 t_m A_a \left(\frac{r}{R_p} \right)^\nu \right]^{\frac{1}{2\nu+1}}, \quad (11)$$

где R_p , t_m , ν – параметры микрогеометрии; r – приведенный радиус закругления вершин микровыступов.

Учитывая, что связь между ФПК и нормальной нагрузкой здесь присутствует в явной форме, это соотношение удобно для расчета фрикционного взаимодействия ленты с контртелом.

Дифференциальное уравнение и его решение соответствуют формулам (9), (10). Однако коэффициенты, входящие в формулы, выражаются иначе:

$$\gamma = 2\nu / (2\nu + 1),$$

$$B_5 = \tau_0 (0,43 k_3 E_n)^{-\gamma} [0,5 t_m R b (r/R_p)^\nu]^{1-\gamma}. \quad (12)$$

Используя формулы (10) и (12), необходимо иметь в виду, что при расчете приведенного модуля упругости следует пользоваться значениями модуля упругости и коэффициента Пуассона не несущего каркаса ленты, а

контактирующих с направляющей поверхностью структурных элементов покрытия ленты. Например, у абразивных лент это зерно абразива.

Библиографический список

1. Андреев, А.В. Передача трением / А.В. Андреев. М.: Машиностроение, 1978. 176 с.
2. Беркович, И.И. Теоретические основы фрикционного взаимодействия дисперсных материалов с твердой поверхностью: монография / И.И. Беркович, А.Н. Болотов, Ю.И. Морозова. Тверь: ТвГТУ, 2012. 92 с.
3. Демкин, Н.Б. Качество поверхностей и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. М.: Машиностроение, 1981. 224 с.

УДК 621.891

В.В. Мешков, Д.А. Зоренко
Тверской государственной технической университет

CAE-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ОПРЕДЕЛЕННОЙ СУБМИКРОГЕОМЕТРИИ

Изложены результаты исследования распределения температурных полей по поверхности трения при интенсивном фрикционном взаимодействии, полученные с помощью компьютерной CAE-модели, учитывающей особенности субмикроеометрии.

Ключевые слова: CAE-моделирование, субмикроеометрия поверхности, интенсивное фрикционное взаимодействие.

CAE-SIMULATION OF TEMPERATURE FIELDS OF THE FRICTION SURFACE WITH REGARD FOR EXPERIMENTALLY DEFINED SUBMICROGEOMETRY

The results of the research of the distribution of temperature fields on the friction surface at the intense friction interaction are obtained with the help of computer CAE-model. The model takes into account the peculiarities of submicrogeometry.

Keywords: CAE-simulation, surface submicrogeometry, intense friction interaction.

Важной проблемой узлов трения высокоскоростного транспорта является создание конструкций и материалов, обеспечивающих работоспособность и надежность функционирования изделий [1].

Эта сложная проблема предполагает проведение широкого спектра исследований состава материалов, технологий получения из них деталей, фрикционного взаимодействия материалов, в том числе интенсивного фрикционного взаимодействия.

Анализ литературных источников показывает, что в РФ исследования по изучению трансформации структуры и состава металлического сплава на субмикроруровне при интенсивном фрикционном взаимодействии и его компьютерном моделировании проводятся в нескольких исследовательских центрах, при этом не разработаны методики исследования фрикционного взаимодей-

ствия на субмикроруровне для сложнолегированных металлических сплавов. Таким образом, актуальными являются экспериментальные исследования с применением новейших методов исследования состава и структуры [2–4].

Исследования, проводимые в Тверском государственном техническом университете, направлены на разработку методик исследования трансформации структуры при интенсивном фрикционном взаимодействии методами сканирующей зондовой микроскопии (с использованием латеральных сил) и компьютерного моделирования интенсивного фрикционного взаимодействия с учетом субмикроруровня.

Моделирование температурных полей поверхности трения. Для построения математической и компьютерной модели интенсивного фрикционного взаимодействия тел методом конечных элементов в качестве части исходных данных использовались результаты исследования геометрии и свойств контактирующих поверхностей с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Сам же метод моделирования по существу сводится к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью подобластей (или элементов), имеющих конечное число степеней свободы. Затем между этими элементами устанавливается взаимосвязь.

Задача решалась применительно к паре тормозной диск-накладка высокоскоростного поезда. При проведении расчетов принимали основные допущения: источник тепловой энергии локализован в тонком слое контакта тормозного диска и накладки в форме кольца; общее количество энергии, выделяемой при торможении, определяется из условия, что ее количество равно работе тормозных сил; конвектируемые поверхности расположены на тормозном диске.

Материал тормозного диска – коррозионно-стойкая жаропрочная сталь мартенситного класса 20Х13. Энтальпия для стали определяется на основании справочных данных. Коэффициент теплоотдачи изменяется линейно от максимального значения, определенного для начала процесса торможения до соответствующего значения в конце торможения. Конвекция тормозного диска осуществляется на поверхностях, не находящихся в контакте с другими деталями и эффективно обдуваемых встречным потоком воздуха. Теплопроводность стали 20Х13 несущественно зависит от температуры в интервале температур от 0 до 700°С.

Расчет температурного поля тормозного диска является стационарной тепловой задачей, если принять допущения, указанные выше [5, 6]. Уравнение теплопроводности в сплошной среде имеет вид

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q = 0, \quad (1)$$

где T – температура; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} – коэффициенты теплопроводности в направлениях x , y , z ; Q – источник тепла внутри тела, который считается положительным, если тепло подводится к телу.

Если на границе происходит конвективный теплообмен, который характеризуется величиной $h(T - T_\infty)$, или задан поток тепла q , то граничное условие имеет вид [5]

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z + h(T - T_\infty) = 0, \quad (2)$$

где h – коэффициент теплообмена; T – температура на границе (неизвестная); T_∞ – температура окружающей среды (известная); l_x, l_y, l_z – направляющие косинусы; q – поток тепла, который считается положительным, если тело теряет тепло. Для оценки температурного режима с учетом фактической площади контакта диска и колодки были произведены расчеты теплопереноса в программном комплексе *FlowVision 3.08* [7]. При расчете фактической площади контакта использовалась топология поверхностей трения на субмикроруровне, полученная с помощью атомно-силовой микроскопии (рис. 1). Полученные данные о микрогеометрии поверхности трения могут быть использованы для решения задачи трехмерного моделирования реальных поверхностей.

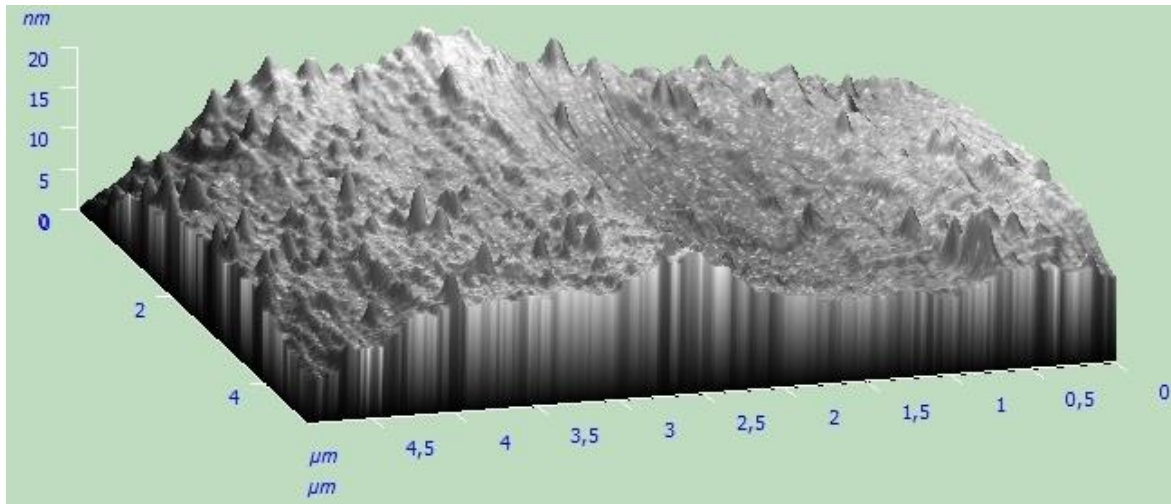


Рис. 1. Объемное растровое изображение поверхности трения, полученное с помощью *ACM Solver P47 PRO* (площадь сканирования 5×5 мкм)

Атомно-силовой микроскоп в результате сканирования позволяет получить массив точек поверхности, по которым имеется возможность построения векторных оболочковых 3D-моделей (рис. 2), с которыми можно работать как в *CAD*-системах, так и экспортировать их в *CAE*-системы.

Зная прочностные характеристики материала, можно определить степень сближения поверхностей в процессе контактирования. Основными данными для расчета являлись: марка материала – сталь 20X13, удельное давление в контакте порядка 3 МПа. Используя полученную 3D-модель, легко проводить измерения площади фактического контакта для определения процентного отношения к номинальной площади. Установлено, что фактическая площадь поверхности контакта лежит в диапазоне до 40% от номинальной. В дальнейшем это значение применялось при проведении расчетов распределения температурных полей. В результате этого можно сделать вывод о

наиболее достоверной картине распределения температурных полей при проведении расчета, учитывающего фактическую площадь контакта, определенную на субмикроруровне.

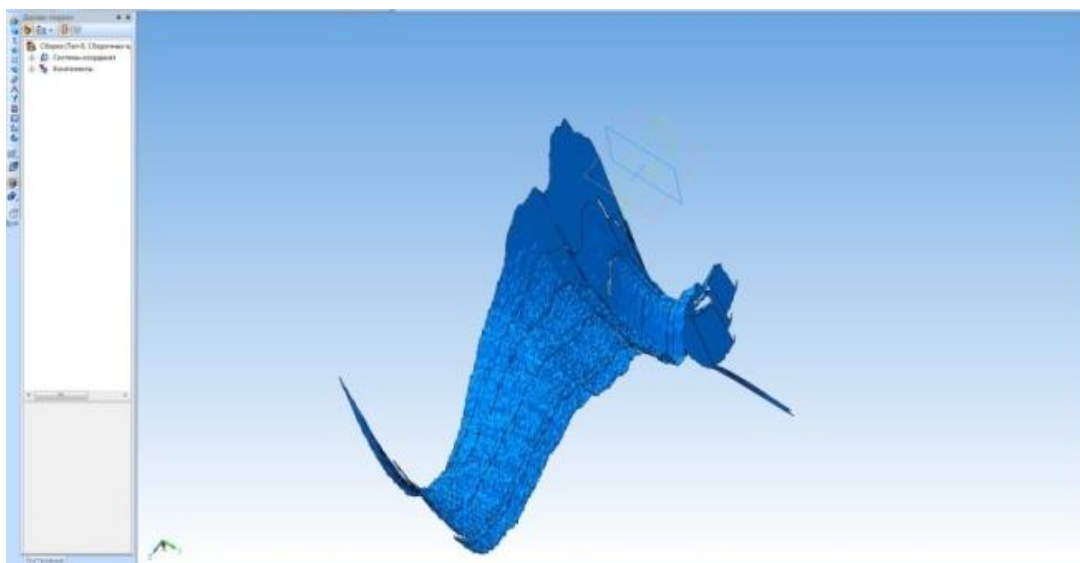


Рис. 2. Трехмерная векторная модель (оболочка) поверхности трения, построенная в программе Компас-3D по данным, полученным методом АСМ

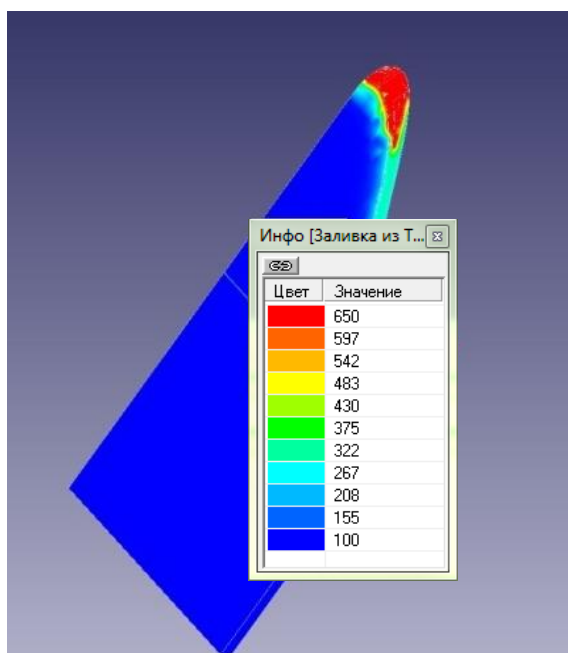


Рис. 3. Расчетная модель теплопереноса в поверхностном слое дорожки трения на локальном участке размером 0,1 мкм (программная среда FlowVision 3.08)

Полученная 3D-модель локального участка поверхности размером 0,1 мкм в результате моделирования распределения температурного поля на этом участке (рис. 3) показала, что температура на локальных выступах поверхности может достигать значительно больших значений, чем полученные при расчете без учета субмикрорегеометрии поверхности. По результатам виртуальных расчетов температура выступов достигала 650–750°C.

Заключение. Таким образом, разработаны математическая и компьютерная модели, позволяющие сформировать методику исследования трансформации структуры при интенсивном фрикционном взаимодействии, используя методы сканирующей зондовой микроскопии. Это, в свою очередь, позволяет с высокой точностью

определять температурные поля тяжело нагруженных деталей узлов трения, работающих в условиях интенсивного фрикционного взаимодействия, и оптимизировать их конструкцию.

Библиографический список

1. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка / А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
2. Батурин, А.С. Микроскопия латеральных сил: количественный подход / А.С. Батурин, А.А. Чуприк, Е.П. Шешин // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 8. С. 23-27.
3. Афанасьева, Л.Е. Увеличение ресурса разделительных штампов с применением наплавки / Л.Е. Афанасьева, В.П. Водопьянова, Н.С. Зубков, А.Ю. Лаврентьев // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. № 4. С. 32-37.
4. Болотов, А.Н. Исследование триботехнических свойств пьезомагнитожидкостных подшипников / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 10. С. 76-82.
5. Балакин, В.А. Расчет температурных полей в дисковом тормозе железнодорожного подвижного состава / В.А. Балакин, Э.И. Галай // Трение и износ. 1998. № 3. С. 323-330.
6. Мешков, В.В. Исследование поверхностных слоев высоколегированных сталей при торможении / В.В. Мешков, В.Л. Хренов, Р.С. Вареца, Д.А. Зоренко // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 4. С. 371-376.
7. Лавров, А.В. Использование программной среды «FlowVision» в качестве виртуальной лаборатории при проведении проектных расчетов узла поджига для машин термической резки металлов / А.В. Лавров, Д.А. Зоренко // САПР и графика. 2007. № 4. С. 32-36.

УДК 621.891

А.Н. Болотов, О.В. Сутягин, А.А. Рачишкин
Тверской государственный технический университет

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОГРАФИИ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Разработана компьютерная трехмерная модель шероховатой поверхности. Проведена оценка соответствия опорных кривых поверхности и профилей для различных типов моделей. Разработанная модель может быть использована при расчетах характеристик контактного взаимодействия.

Ключевые слова: топография шероховатых поверхностей, трехмерное компьютерное моделирование шероховатой поверхности, опорные кривые поверхности и профилей, бета-распределение.

COMPUTER SIMULATION OF TOPOGRAPHY OF THE ROUGH SURFACES

The computer 3-D model of the rough surface is developed. The correspondence evaluation of the bearing curves for surface and profiles in different model types is carried out. The developed model can be used for calculation of contact interaction characteristics.

Keywords: topography of rough surfaces, 3-dimensions computer simulation of rough surface, bearing curves for surface and profiles, beta-distribution.

Для расчета характеристик контактного взаимодействия шероховатых поверхностей необходимо располагать параметрами их микрогеометрии. На их основе проводят моделирование реальной шероховатой поверхности набором выступов, имеющих правильную геометрическую форму и распределен-

ных по высоте так, чтобы распределение материала модели соответствовало распределению материала реальной шероховатой поверхности [1]. В настоящее время микротопография поверхности оценивается в основном по характеристикам профиля [2]. Для этого созданы приборы и разработаны методики обработки профилограмм, данные с которых отождествляют со статистическими характеристиками шероховатых поверхностей [3]. В общем случае характеристики микротопографии шероховатой поверхности не совпадают с характеристиками профиля этой поверхности [4, 5]. Анализ микротопографии поверхностей продолжает представлять существенные трудности даже при применении предназначенных для этого трехмерных профилографов [6]. Одним из выходов в этой ситуации является создание трехмерной модели шероховатой поверхности, наиболее близкой к реальной, с использованием ее для дальнейших расчетов характеристик контакта с учетом известных подходов [7–9].

Математическая модель шероховатой поверхности. Для создания компьютерной трехмерной модели шероховатой поверхности разработана математическая модель, описывающая ее микротопографию. Номинально плоская шероховатая поверхность представляет из себя совокупность выступов и впадин [2]. Для большинства задач контактного взаимодействия достаточно анализа только части шероховатого слоя, состоящего из выступов шероховатой поверхности [1], поэтому далее рассматривается шероховатый слой, расположенный выше средней плоскости. Согласно [2], под средней плоскостью будем понимать плоскость, эквидистантную номинальной и расположенную на уровне средней линии профиля.

Выступы шероховатой поверхности моделируются одинаково ориентированными сегментами эллипсоидов вращения, координаты центров оснований которых распределены по задаваемому случайному закону на средней плоскости. Частным случаем эллипсоидальных сегментов являются сферические сегменты, широко применяемые для исследования изотропных шероховатых поверхностей [1].

Высоты сегментов и их радиусы также изменяются по задаваемому случайному закону. В качестве задаваемого случайного закона в модели шероховатой поверхности используется бета-распределение [10], выбранное как наиболее универсальное. При соответствующем изменении его параметров функция плотности вероятности может быть одновершинной (с максимумом), U -образной (с минимумом), равномерной, монотонно возрастающей и убывающей [10]. Используя бета-распределение, можно моделировать как гауссовские поверхности, так и поверхности, имеющие детерминированную составляющую. Вид бета-распределения переменной z с параметрами v и w можно определить как

$$f(z) = \frac{\Gamma(v+w)}{\Gamma(v)\Gamma(w)} z^{v-1}(1-z)^{w-1}, \quad (1)$$

где $f(z)$ – функция бета-распределения; $\Gamma(X)$ – гамма функция X ; X – переменная гамма функции.

Высота каждого i -го генерируемого выступа (ГВ) h_i , продольный r_{xi} и поперечный r_{yi} радиусы вершин ГВ, продольный S_{xi} и поперечный S_{yi} шаги координаты центров оснований ГВ по средней плоскости рассчитываются по закону бета-распределения (1) с частными параметрами бета-распределения v_h и w_h для высот, v_{rx} w_{rx} и v_{ry} w_{ry} для радиусов и v_{sx} w_{sx} и v_{sy} w_{sy} для шагов координат ГВ соответственно. При этом переменная z в уравнении (1) определяет относительные значения высот z_h , продольных z_{rx} и поперечных z_{ry} радиусов вершин ГВ, продольных z_{sx} и поперечных z_{sy} шагов координат центров оснований ГВ. Для того чтобы относительные значения этих переменных лежали в диапазоне $[0 \dots 1]$, необходимо для переменной z в уравнении (1), их удобно определять как

$$\begin{aligned} z_h &= \frac{h}{R_p}, & z_{rx} &= \frac{r_x - r_{xmin}}{r_{xmax} - r_{xmin}}, & z_{ry} &= \frac{r_y - r_{ymin}}{r_{ymax} - r_{ymin}}, \\ z_{sx} &= \frac{S_x - S_{xmin}}{S_{xmax} - S_{xmin}}, & z_{sy} &= \frac{S_y - S_{ymin}}{S_{ymax} - S_{ymin}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где R_p – максимальная высота выступа шероховатой поверхности [2]; r_{xmin} , r_{xmax} – минимальный и максимальный продольные радиусы вершин выступов шероховатой поверхности; r_{ymin} , r_{ymax} – минимальный и максимальный поперечные радиусы вершин выступов шероховатой поверхности; S_{xmin} , S_{xmax} – минимальный и максимальный продольные шаги неровностей по средней линии [2]; S_{ymin} , S_{ymax} – минимальный и максимальный поперечные шаги неровностей по средней линии [2].

Перечисленные выше параметры и общее количество ГВ n являются входными для моделирования поверхности, связывают модель с реальной шероховатой поверхностью и отражены в интерфейсе разработанной программы.

В процессе генерации выступов соотношение их размеров необходимо проверять из условия:

$$r_{xi} > h_i, \quad r_{yi} > h_i. \quad (3)$$

Выполнение условия (3) доказывает, что каждый ГВ является сегментом эллипсоида.

Для вычислений полуосей сегментов эллипсоидов в различных плоскостях в программе использовались соотношения [11].

Компьютерная модель шероховатой поверхности. На базе рассмотренной математической модели разработана компьютерная модель, в которой реализованы: гибкий алгоритм, возможность развития функционала, высокое быстродействие, запись и хранение данных по каждому выступу смоделированной поверхности. Система контроля позволит следить за этапами работы программы в ходе построения модели и последующей обработки полученных данных. Интерфейс программы представлен на рис. 1.

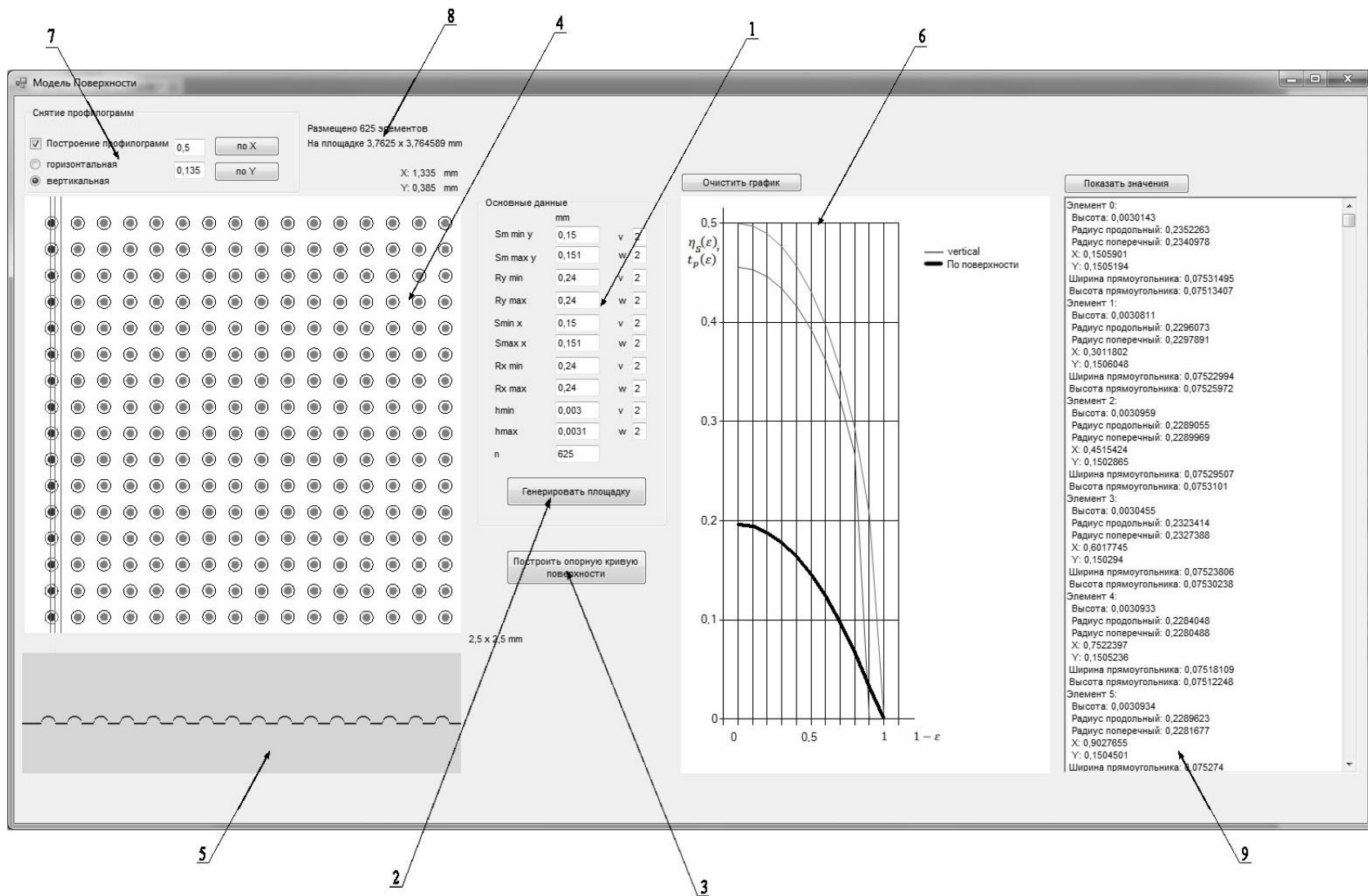


Рис. 1. Интерфейс программы

Интерфейс программы включает в себя элементы: блок ввода данных, необходимых для построения компьютерной модели 1 и расположенные ниже него командные кнопки: 2 – включения генерации модели шероховатой поверхности и 3 – включение построения графика опорной кривой смоделированной поверхности; окно 4, визуальное отображающее участок сгенерированной модели шероховатой поверхности, с текущими размерами ГВ; окно 5, служащее для построения профилограмм, и окно 6, предназначенное для построения графиков опорной кривой смоделированной поверхности и снятых с нее профилограмм. Построение графиков опорных кривых горизонтальных и вертикальных профилей модели шероховатой поверхности возможно с помощью клика мыши в визуальном окне 4 или заданием соответствующих координат в ячейках ввода координат профиля 7. Вывод информации о количестве неровностей, размещенных на шероховатой поверхности, и ее общих размерах отображается в блоке 8. Список основных характеристик каждой неровности смоделированной поверхности размещен в окне 9 и представляет собой последовательное отображение объектов класса, хранящего микрогеометрические характеристики ГВ.

Для начала работы с компьютерной моделью необходимо ввести в соответствующие ячейки блока 1 интерфейса исходные характеристики моделируемой шероховатой поверхности и нажать кнопку 2. Далее по специальному алгоритму программа последовательно проектирует каждый ГВ, опираясь на заданные параметры и ограничивающие условия, установленные для обеспечения верной логики расположения и формы неровностей. После окончания построения возникает возможность снятия опорной кривой поверхности и профиля, вывода профилограмм, изменение входных характеристик модели с последующей новой генерацией площадки модели шероховатой поверхности.

Тестирование компьютерной модели шероховатой поверхности. Для проверки адекватности получаемых с помощью предлагаемой модели численных результатов было проведено ее тестирование. С этой целью сгенерировали детерминированную модель шероховатой поверхности, состоящую из одинаковых сферических сегментов, расположенных в узлах квадратной решетки с постоянным шагом (рис. 2). При этом были заданы параметры шероховатости: $S_{xmin} = S_{ymin} = 0,15$ мм; $S_{xmax} = S_{ymax} = 0,151$ мм; $r_{xmin} = r_{ymin} = 0,24$ мм; $r_{xmax} = r_{ymax} = 0,241$ мм; $h_{min} = 0,003$; $h_{max} = 0,0031$; $n = 625$; $v = w = 2$ для всех параметров. Общий вид данной поверхности, отображаемый в окне интерфейса 4, с трассами профилограмм показан на рис. 2а. При этом выбор положения трасс соответствовал условиям: a – трасса по вершинам поверхности; b – трасса по поверхности в произвольной зоне вершин; c – трасса по поверхности вне зоны вершин.

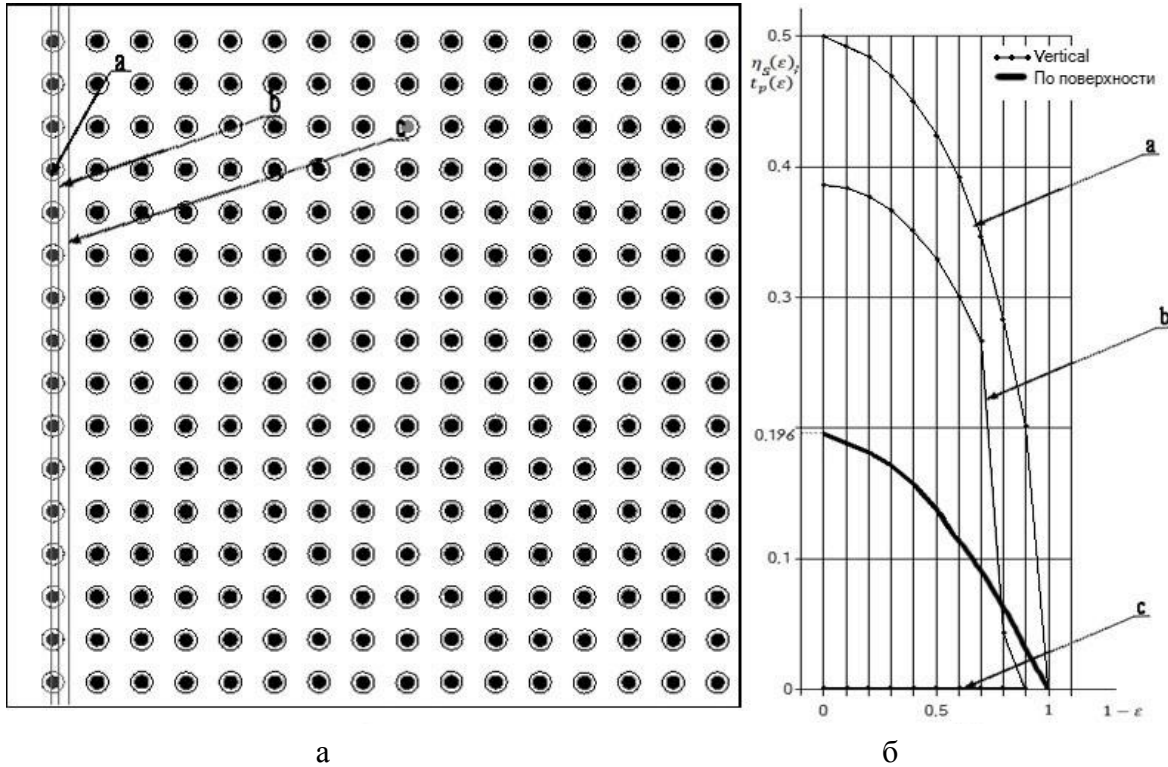


Рис. 2. Детерминированная модель шероховатой поверхности:
 а – общий вид и расположение трасс;
 б – графики опорных кривых профилей и поверхности

Построенные программой в окне б графики опорных кривых профилей смоделированной поверхности представлены на рис. 2б. По оси ординат откладываются: $\eta_s(\varepsilon)$ – значения относительной площади сечений всех выступов для опорной кривой поверхности на различных уровнях сечения поверхности плоскостями S , которые параллельны средней плоскости и расположены на относительных уровнях $\varepsilon = s/R_p$, где s – уровень сечения плоскости S относительно средней плоскости; $t_p(\varepsilon)$ – значения относительной длины всех хорд фигур сечения поверхности плоскостью P , перпендикулярной средней плоскости, проходящей через трассу, для различных сечений поверхности. По оси абсцисс для удобства анализа вместо ε откладываются значения $1 - \varepsilon$ [1]. Как видно из представленных данных, опорные кривые профилей соответствующих трасс достоверно отражают распределения материала в сечениях пересеченных выступов и не совпадают с графиком опорной кривой смоделированной поверхности.

Можно показать, что для любой аналогичной детерминированной модели шероховатой поверхности при условии $r_i \gg h_i$ значение относительной площади сечения поверхности срединной плоскостью определяется как

$$\eta_s(1) = \frac{\pi}{4} t_{mmax}^2, \quad (4)$$

где t_{mmax} – максимальная относительная опорная длина профиля на средней линии модели шероховатой поверхности.

В рассматриваемой модели $t_{mmax} = 0,5$ (трасса а), рассчитанное по (4), значение $\eta_s(1) = 0,196$. Это совпадает с рассчитанным программой значением $\eta_s(1)$ (см. рис. 2б).

Чаще рассматриваются модели изотропных случайных шероховатых поверхностей [8], состоящие из сферических сегментов, расположенных случайно на средней плоскости и имеющих высоты и радиусы, распределенные также по случайному закону (рис. 3). Значения параметров микрогеометрии, используемых при генерации приведенной поверхности, составляют: $S_{xmin} = 0,075$ мм; $S_{ymin} = 0,075$ мм; $S_{xmax} = 0,186$ мм; $S_{ymax} = 0,186$ мм; $r_{xmin} = r_{ymin} = 0,5$ мм; $r_{xmax} = r_{ymax} = 0,6$ мм; $h_{min} = 0,00001$ мм; $h_{max} = 0,005$ мм; $n = 625$; $v = w = 2$ для всех параметров. Данные параметры шероховатости были получены при усреднении параметров профилограмм для доведенных плоских стальных образцов. При $v = w = 2$ бета-распределение симметрично относительно среднего значения и приближается к распределению Гаусса. Число выступов поверхности $n = 625$ выбрано на основании вывода работы [3] о статистической достоверности данных, получаемых по результатам обработки профилограмм при количестве выступов на профиле больше 25. Общий вид сгенерированной поверхности показан на рис. 3а.

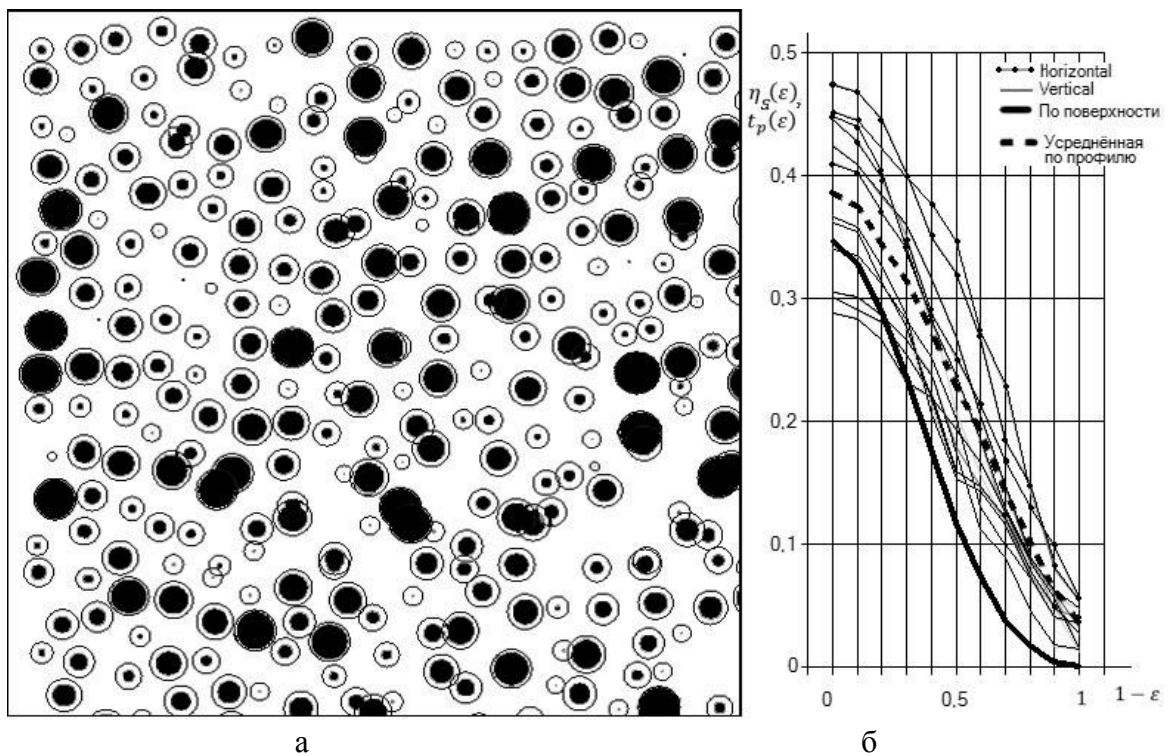


Рис. 3. Случайная модель шероховатой поверхности:
а – общий вид поверхности; б – графики опорных кривых профилей и поверхности

Построенные программой в окне б интерфейса графики опорных кривых профилей и смоделированной поверхности представлены на рис. 3б. Данные, представленные на рис. 3а, отражают информацию о сгенерированной поверхности: расположение сегментов на средней плоскости при виде сверху,

размеры оснований сегментов (диаметры окружностей), относительные высоты выступов (диаметры тонированных кругов внутри окружностей). Причем чем относительная высота больше, тем больше размер тонированного круга по сравнению с описывающей его окружностью. На рис. 3б представлены графики опорных кривых пяти продольных профилограмм и пяти поперечных профилограмм, а также их усредненная опорная кривая (пунктир) в сопоставлении с графиком опорной кривой поверхности (сплошная), построенные программой. Как видно из представленных результатов, усредненная опорная кривая профилей и поверхности для случайной изотропной модели шероховатой поверхности не совпадают, что подтверждает результаты анализа, представленного в работах [4, 5]. Однако характер полученных кривых достаточно близок, что позволяет при оценке характеристик контакта использовать профилограммы поверхностей, обладающих шероховатостью, удовлетворяющей такой модели [1, 3].

Исследование реальных шероховатых поверхностей с помощью компьютерной модели. Для измерения параметров микрогеометрии реальных шероховатых поверхностей использовался профилометр *TR200 (Time Group Inc, Chine)*. Методика определения исследуемых параметров основана на инструкции производителя оборудования. В качестве объектов исследования использовались стальные образцы шероховатости поверхностей, обработанные торцевым фрезерованием, плоским шлифованием и доводкой. Профилограммы с каждого образца с целью учета анизотропии шероховатости и накопления данных для последующей статистической обработки снимались по пяти продольным и пяти поперечным трассам. В стандартных параметрах шероховатости, измеряемых данным прибором, отсутствует средний радиус выступов необходимый для моделирования поверхности. Можно показать, что значение среднего радиуса выступов профиля выражается через стандартные параметры микрогеометрии [8] соотношением вида

$$\bar{r} = \frac{t_m^2 S_m^2}{8R_a}, \quad (5)$$

где \bar{r} – средний радиус выступов профиля; t_m – относительная опорная длина профиля по средней линии; S_m – средний шаг профиля по средней линии; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии.

Результаты измерений показали существенный разброс параметров микрогеометрии, получаемых при исследовании поверхности одного и того же образца на различных трассах (табл. 1).

На рис. 4 представлены общие виды моделей шероховатых поверхностей, сгенерированных на основании полученных данных, в сопоставлении с графиками опорных кривых профилей моделей и реальных поверхностей. При этом представленные графики являются результатами статистической обработки опорных кривых профилограмм реальных шероховатых поверхностей, предельные значения которых представлены в табл. 1, и соответствующих моделей этих поверхностей, исходные данные для которых представлены в табл. 2. При моделировании поверхностей для значений r_{min} и r_{max} принимались значения $\bar{r} \pm 50\%$.

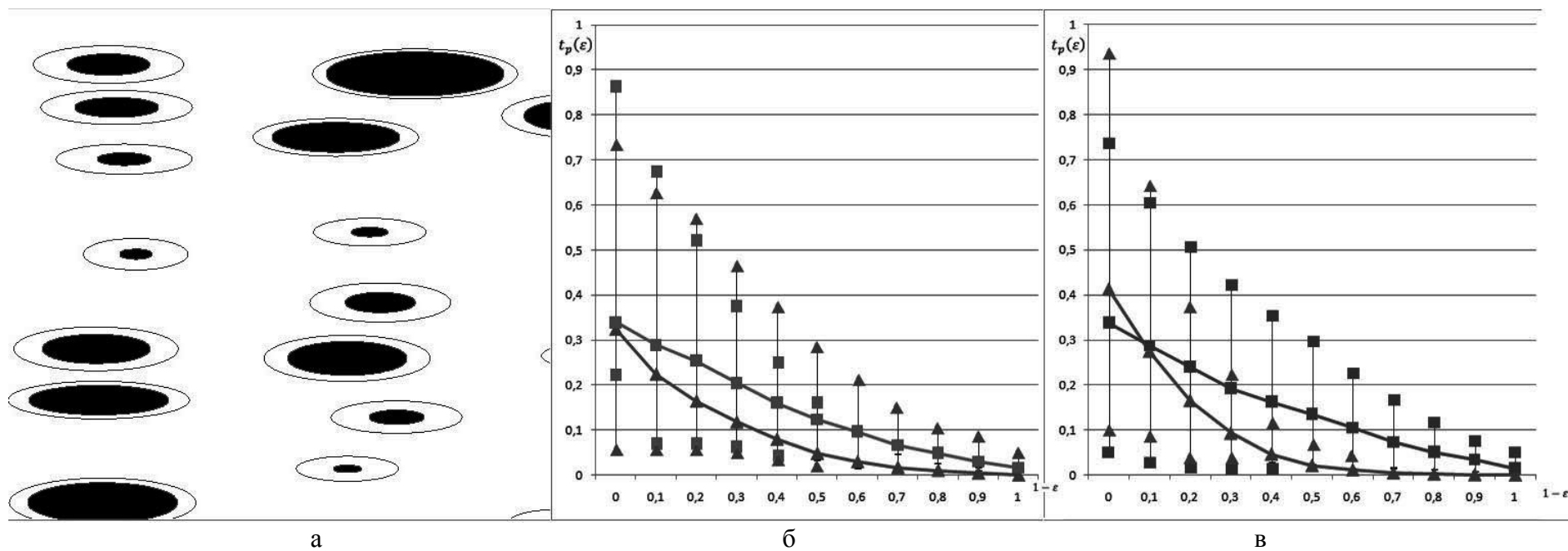


Рис. 4. Моделирование реальных шероховатых поверхностей:
 а – ТФ общий вид модели; б – ТФ опорные кривые по X; в – ТФ опорные кривые по Y

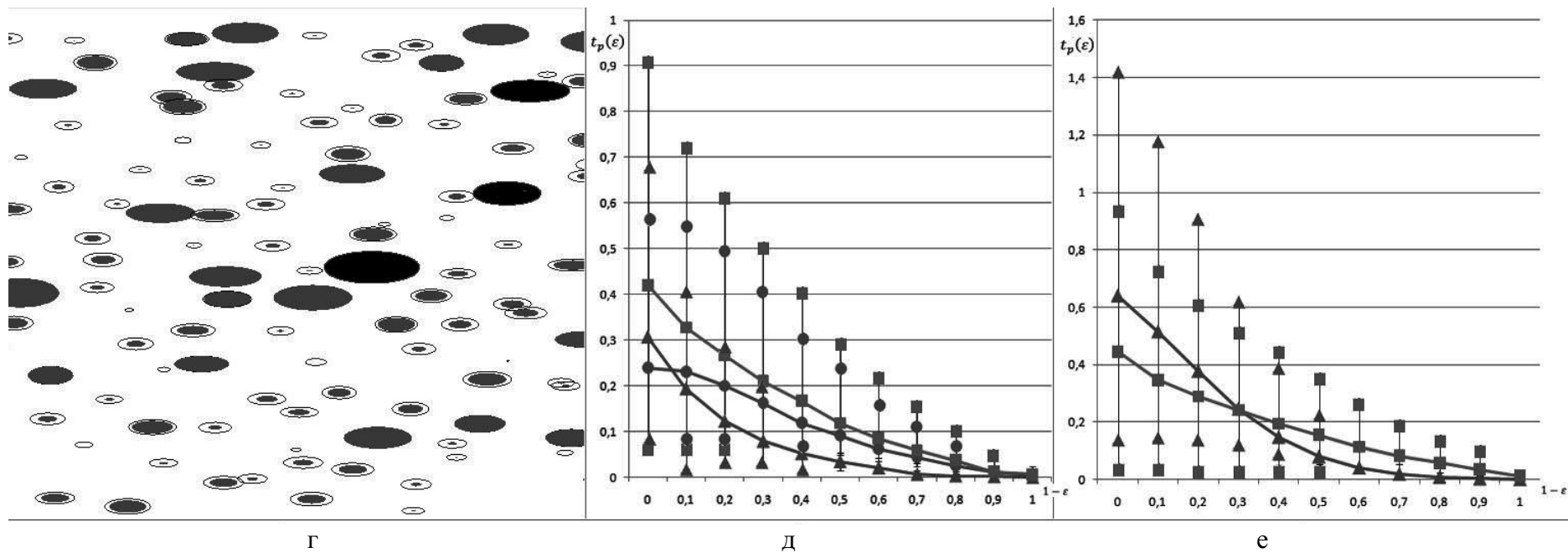


Рис. 4. Продолжение:
 г – ПШ общий вид модели; д – ПШ опорные кривые по X; е – ПШ опорные кривые по Y

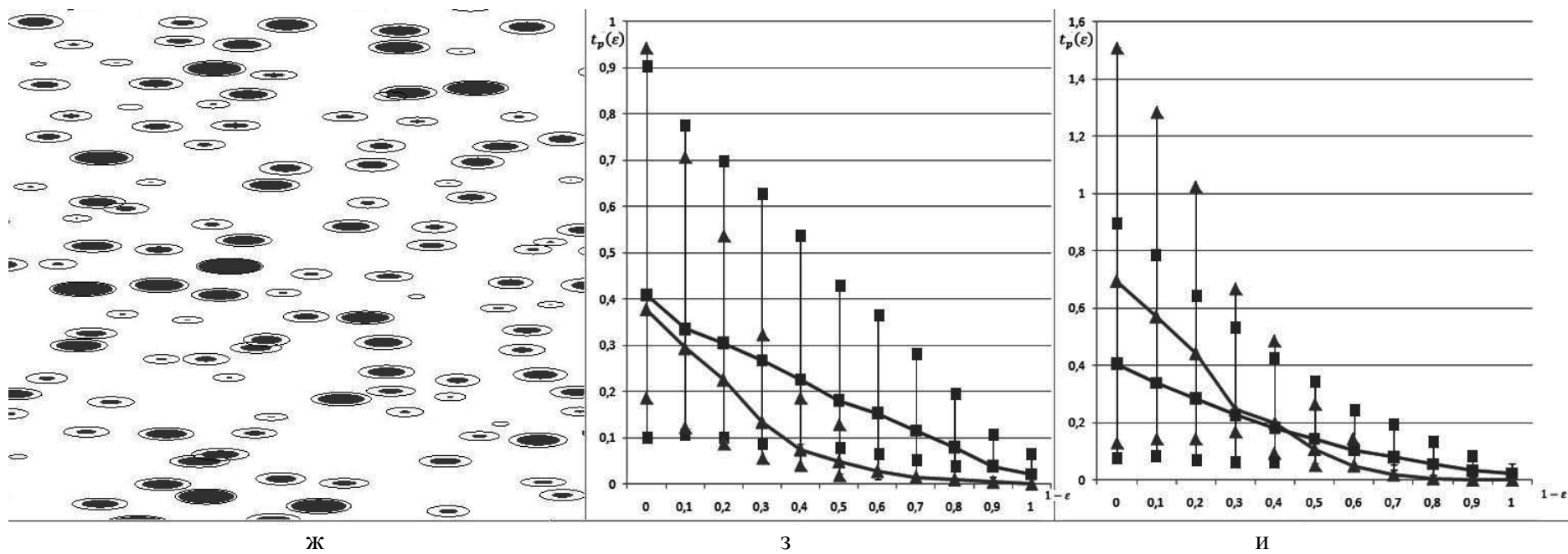


Рис. 4. Окончание:
 ж – Д общий вид модели; з – Д опорные кривые по X; и – Д опорные кривые по Y

Таблица 1. Предельные параметры микрогеометрии шероховатых поверхностей

Технология обработки поверхности	Трасса и ее напр.	Ra, мкм	Sm, мм	tm	\bar{r} , мм	Rp, мкм
Торцевое фрезерование (ТФ)	x-1	0,22	0,9	0,25	4	0,5
	x-2	0,3	1,3	0,64	41	0,6
	y-1	0,7	0,3	0,33	0,46	2,4
	y-2	0,87	0,37	0,64	2,1	2,8
Плоское шлифование (ПШ)	x-1	1,2	0,52	0,26	0,27	3,7
	x-2	2	0,9	0,44	1,63	6,1
	y-1	3,7	0,13	0,46	0,07	7,9
	y-2	6,1	0,15	0,7	0,15	9,3
Доводка (Д)	x-1	0,5	0,46	0,27	0,61	1,8
	x-2	1	0,66	0,73	7	2,9
	y-1	1,3	0,1	0,51	0,08	4,1
	y-2	1,5	0,12	0,75	0,2	4,9

На графиках (рис. 4) треугольниками обозначены средние точки и доверительные интервалы опорных кривых профилей реальных поверхностей, прямоугольниками – средние точки и доверительные интервалы опорных кривых профилей моделей с параметрами из табл. 2 при $v_{sx} = w_{sx} = v_{sy} = w_{sy} = v_h = w_h = 2$, $v_{rx} = w_{rx} = v_{ry} = w_{ry} = 3$ [12].

Таблица 2. Исходные данные для компьютерного моделирования реальных шероховатых поверхностей

Технология обработки поверхности	Трасса	r_{\min} , мм	r_{\max} , мм	S_{\min} , мм	S_{\max} , мм	Rp, мкм
ТФ	x	23,09	28,2	0,948	1,508	4,1
	y	0,775	1,8	0,158	0,502	
ПШ	x	0,41	1,8	0,165	1,15	9,3
	y	0,102	0,25	0,084	0,182	
Д	x	1,55	3,5	0,155	0,975	5,44
	y	0,1	0,4	0,075	0,1864	

Как видно из представленных данных, статистически обработанные опорные кривые профилограмм моделей находятся в статистическом соответствии с обработанными опорными кривыми профилограмм реальных шероховатых поверхностей. Различие в значениях и характере опорных кривых профилограмм модели и реальной шероховатой поверхности объективно связано с систематическим отличием формы поверхности реального выступа от сегмента эллипсоида вращения. Кроме того, при трехмерном описании модели использовался только шаг выступов по средней линии и игнорировался более мелкий шаг выступов по вершинам [2], что вызывает неточности при описании реальных шероховатых поверхностей. При значительных отклонениях усредненной опорной кривой профилограммы модели от соответствующей опорной кривой профилограммы реальной шероховатой поверхности (рис. 4д) возможна ее корректировка параметрами бета-распределения v и w . Соответствующая скорректированная кривая и доверительные интервалы показаны на

рис. 4д кружками. Расчеты были проведены для параметров бета-распределения: $v_{sx} = 2$, $w_{sx} = 5$, $v_{sy} = 2$, $w_{sy} = 5$, $v_h = 2$, $w_h = 3$, $v_{rx} = w_{rx} = v_{ry} = w_{ry} = 3$.

Заключение. Разработанная компьютерная трехмерная модель шероховатой поверхности наиболее приближена к реальной и может быть использована для расчетов характеристик контактного взаимодействия с учетом результатов работ [13–15]. Функция опорной кривой шероховатой поверхности единственна для данной поверхности и отражает распределение материала в шероховатом слое, а функции любого его профиля случайны и не совпадают с функцией, описывающей опорную кривую поверхности.

Библиографический список

1. Демкин, Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. М.: Наука, 1970. 227 с.
2. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1982. 20 с.
3. Демкин, Н.Б. Топографические характеристики поверхности и точность их определения / Н.Б. Демкин, М.А. Коротков // Механика и физика контактного взаимодействия: межвуз. сб. науч. тр. Калинин: КГУ, 1978. С. 16-29.
4. Беркович, И.И. Расчет статистических характеристик шероховатой поверхности / И.И. Беркович, М.С. Курова // Механика и физика контактного взаимодействия: межвуз. сб. науч. тр. Калинин: КГУ, 1977. С. 3-16.
5. Izmailov, V.V. Correlation between surface topography and profile statistical parameters / V.V. Izmailov, M.S. Kourova // Wear. 1980. V. 59. P. 409-420.
6. Бенгтссон, А. Получение топографического изображения поверхности с помощью профилографа / А. Бенгтссон, А. Ренберг // Трение и износ. 1986. Т. 7. № 1. С. 27-35.
7. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 478 с.
8. Демкин, Н.Б. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей / Н.Б. Демкин, В.В. Измайлов // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 1. С. 7-15.
9. Bhushan, V. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact / V. Bhushan // Tribology letters. 1998. № 4. P. 1-35.
10. Измайлов, В.В. Применение бета-распределения для расчета характеристик контакта шероховатых тел / В.В. Измайлов, М.С. Курова // Трение и износ. 1983. Т. IV. № 6. С. 983-990.
11. Математическая энциклопедия в 5 т. / Под ред. И.М. Виноградова // Изд. Советская энциклопедия, 1979. Т. 5. 1242 с.
12. Измайлов, В.В. О связи распределений по радиусам выступов шероховатого слоя на поверхности и на профиле / В.В. Измайлов, М.С. Курова // Механика и физика контактного взаимодействия: межвуз. сб. науч. тр. Калинин: КГУ, 1976. С. 6-12.
13. Болотов, А.Н. Критерий перехода к пластическим контактным деформациям в тяжело нагруженных узлах трения деталей машин / А.Н. Болотов, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 1. С. 211-213.
14. Болотов, А.Н. Исследование упругопластического контакта сферического индентора с металлами и твердосмазочными покрытиями. Ч. 1. Критические нагрузки / А.Н. Болотов, В.В. Мешков, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 1. С. 5-10.
15. Болотов, А.Н. Исследование упругопластического контакта сферического индентора с металлами и твердосмазочными покрытиями. Ч. 2. Характеристики контактного взаимодействия / А.Н. Болотов, В.В. Мешков, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Трение и износ. 2013. Т. 34. № 2. С. 165-169.

УДК 531.43

В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин
Тверской государственной технической университет

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЕДИНИЧНОГО КОНТАКТА

С помощью карт механизмов фреттинг-изнашивания анализируются результаты экспериментального исследования единичного контакта шаровой зонд – плоский образец при малых тангенциальных смещениях. Исследована контактная пара никелевый зонд – плоский образец из латуни марки Л63 с никелевым покрытием. Индикатором состояния контакта служит контактное электросопротивление. Предложены критерии износостойкости контакта в условиях малых тангенциальных смещений.

Ключевые слова: единичный контакт, фреттинг-изнашивание, карты механизмов фреттинг-изнашивания, контактное электросопротивление, ресурс.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF FRETTING WEAR IN SINGLE CONTACT AS AN EXAMPLE

The maps of fretting wear mechanisms were used for the analysis of single contact of spherical probe with flat specimen at small tangential displacements. The contact pair nickel probe – brass plate with nickel coating was studied. The contact electrical resistance was used as an indicator of contact state. The criteria of contact wear resistance have been proposed in a case of small tangential displacements.

Keywords: single contact, fretting wear, maps of fretting wear mechanisms, contact electrical resistance, lifetime.

Настоящей статьей продолжается публикация результатов теоретического и экспериментального исследования контактного взаимодействия технических поверхностей при малых относительных тангенциальных перемещениях [1, 2], которые соответствуют условиям фреттинг-изнашивания. Распространенность этого вида изнашивания в условно-неподвижных соединениях деталей технических устройств самого различного назначения, а также сложная комплексная природа этого явления являются причиной неослабевающего внимания трибологов вот уже на протяжении без малого ста лет. Среди большого числа факторов, влияющих на процессы деградации контактного соединения в результате фреттинг-изнашивания и фреттинг-коррозии, выделяются в качестве основных нормальная нагрузка, амплитуда тангенциальных микроперемещений и коэффициент трения [3]. На наш взгляд, кроме перечисленных факторов существенное, если не решающее, влияние на ресурс контактного соединения в условиях фреттинг-изнашивания оказывают химические свойства материала контактирующих деталей, а именно его коррозионная стойкость.

В настоящей статье представлены результаты исследования металлического контакта по схеме шар-плоскость, моделирующего единичную площадку дискретного контакта шероховатых и волнистых технических поверхностей. В исследованном единичном контакте радиус контактной

площадки не превосходил 20 мкм, что сравнимо с размерами площадок контакта выступов шероховатых поверхностей.

Экспериментальные образцы и методика испытаний. Эксперименты проводились на установке, описанной ранее [2]. Исследуемый контакт образован тонким однородным металлическим цилиндрическим зондом со сферической формы торцом малого радиуса закругления и плоским образцом из латуни марки Л63, на который наносится электролитическим способом покрытие из исследуемого металла. В данной статье приводятся результаты испытаний пары трения $Ni - Ni$ (никелевый зонд – плоский образец с никелевым покрытием толщиной порядка 8 мкм).

Индикатором текущего состояния контактного соединения, как и в описанных ранее экспериментах [2], служило его электрическое сопротивление. Обоснование выбора данного источника информации о состоянии контакта и электрическая схема измерения сопротивления также приведены в [2]. Отметим, что исследованная пара материалов контактирующих деталей ($Ni - Ni$) широко распространена в разборных и разъемных электроконтактных соединениях, деградация и ресурс которых во многих случаях определяется процессами фреттинг-изнашивания.

Таблица 1. Условия испытаний

Материал контактирующих деталей	$Ni - Ni$	
Эквивалентный модуль Юнга, ГПа	73	
Микротвердость H_M , ГПа	3	
Радиус закругления вершины зонда, мм	0,6	
Нагрузка на зонд, Н	<i>min</i>	0,5
	<i>max</i>	1,4
Амплитуда тангенциального смещения, мкм	<i>min</i>	12
	<i>max</i>	18

Параметры контакта и условия испытаний приведены в табл. 1.

Теоретические предпосылки. В работе [1] показана возможность применения так называемых карт режимов фреттинг-изнашивания для прогнозирования ресурса контактных соединений на основании

математической модели многоточечного дискретного контакта технических поверхностей. Первоначально идея такого описания режимов фреттинг-изнашивания с точки зрения ресурса соединения высказана в работах [4, 5]. Используем этот же подход и в данном случае. Следуя принятой концепции, выделим три характерные режима эксплуатации единичного контакта.

1. Амплитуда A циклических тангенциальных смещений зонда относительно плоской детали не превосходит величину предварительного смещения контакта δ_{max} : $A < \delta_{max}$. Назовем этот случай *режимом сцепления*. Относительное макроскопическое смещение контактирующих деталей отсутствует, но на площадке контакта возникает область относительного проскальзывания с радиусом $c < a$, где a – радиус контактной площадки. Отношение c/a растет с ростом приложенного сдвигающего усилия (или, соответственно, тангенциальной деформации контакта), пока не станет равным единице. Соответствующая величина тангенциальной деформации (величина предварительного смещения единичного контакта) рассчитывается по формуле [6]

$$\delta_{max} = \frac{3fN}{16a} \cdot \left(\frac{2-\mu_1}{G_1} + \frac{2-\mu_2}{G_2} \right), \quad (1)$$

где N – нормальная нагрузка на зонд; f – коэффициент трения; a – радиус контакта; G – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона. Величина G связана с модулем продольной упругости (модулем Юнга) соотношением $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$. Радиус контактной площадки при упругом контактировании рассчитывается по известной формуле Г. Герца:

$$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

где r – радиус закругления вершины зонда; E^* – эквивалентный модуль Юнга, $E^* = \left(\frac{1-\mu_1}{E_1} + \frac{1-\mu_2}{E_2} \right)^{-1}$; E_i и μ_i – модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих деталей.

Критерием упругой деформации контакта может служить величина критического контактного давления $p_{r\text{кр}}$, при котором под поверхностью контакта на его оси зарождаются пластические деформации. Согласно [7] можно принять

$$p_{r\text{кр}} = 0,38H_M, \quad (3)$$

где H_M – микротвердость материала контактирующих деталей (см. табл. 1).

2. Амплитуда тангенциальных смещений A больше величины предельного смещения δ_{\max} , но не превосходит величины диаметра контакта: $\delta_{\max} < A < 2a$. Назовем этот случай *режимом ограниченного проскальзывания*. На площадке контакта происходит макроскопическое проскальзывание, однако величина его ограничена размерами площадки, поэтому контакт окончательно не нарушается. Это наименее желательный режим с точки зрения ресурса контактного соединения [1, 4, 5], соответствующий минимальному ресурсу.

3. Амплитуда тангенциальных смещений больше размеров площадки контакта $A > 2a$. Назовем этот случай *режимом существенного проскальзывания*. По сути, это уже обычное возвратно-поступательное трение. В каждом цикле происходит разрушение старого и формирование нового контакта, что способствует удалению продуктов износа с площадки контакта.

На основании формул (1) – (3) рассчитаны основные характеристики

Таблица 2. Характеристики исследованного единичного контакта

Радиус контакта a , мкм	<i>min</i>	14
	<i>max</i>	20
Отношение диаметра контакта к амплитуде тангенциального смещения $2a/A$	<i>min</i>	1,5
	<i>max</i>	3,3
Фактическое контактное давление p_r , ГПа	<i>min</i>	0,8
	<i>max</i>	1,1
Отношение фактического давления к микротвердости p_r/H_M	<i>min</i>	0,27
	<i>max</i>	0,37
Коэффициент трения	0,25–0,30	

контакта, характеризующие его с точки зрения приведенной выше классификации режимов фреттинг-изнашивания (табл. 2). Коэффициент трения в исследованной паре $Ni - Ni$ определен экспериментально при нормальной нагрузке на зонд 1 Н. Как следует из формулы (3) и табл. 2, деформация контакта носит упругий характер во всех экспериментах.

На основании формул (1) и (2) построена карта режимов фреттинг-изнашивания для исследованного единичного контакта $Ni - Ni$ (рис. 1).

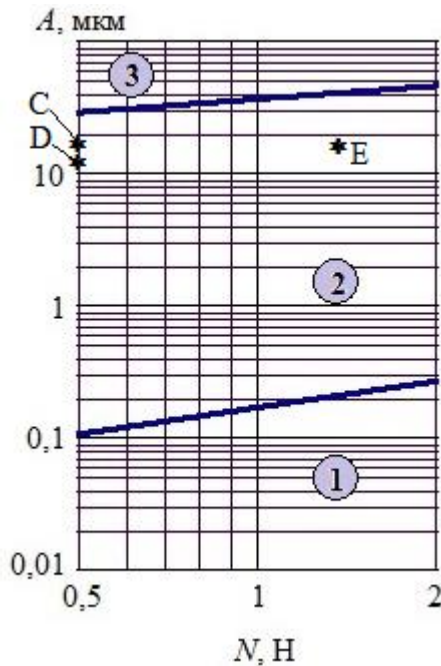


Рис. 1. Карта режимов фреттинг-изнашивания единичного контакта $Ni - Ni$:

N – нормальная нагрузка на зонд;

A – амплитуда тангенциального смещения.

1 – область сцепления;

2 – область ограниченного проскальзывания;

3 – область существенного проскальзывания.

Коэффициент трения $f = 0,25$.

Точками обозначены

режимы испытаний (табл. 3–5):

$C - A = 18$ мкм, $N = 0,5$ Н;

$D - A = 12$ мкм, $N = 0,5$ Н;

$E - A = 18$ мкм, $N = 1,4$ Н

Результаты экспериментов и их обсуждение. Как отмечалось ранее [2], зависимость электрического сопротивления контакта от времени представляет собой нестационарный широкополосный случайный процесс. Характерные особенности этого процесса обсуждаются там же. На рис. 2 для примера приведены типичные реализации случайного процесса $R(t)$ для различных условий испытаний. На графиках (рис. 2) не показаны высокочастотные флуктуации сопротивления, а представлены только максимальное и минимальное значения сопротивления в моменты его фиксации в течение примерно 30 с. Отметим, что теоретические значения сопротивления исследованных в данных экспериментах контактов составляют 1,7–2,4 мОм. Первоначальные значения сопротивления, измеренные по четырехпроводной схеме [2], лежат в основном в диапазоне 2–8 мОм, что неплохо согласуется с расчетом. При этом, как отмечалось ранее [2], в течение первых нескольких циклов электросопротивление в некоторых экспериментах уменьшается, а затем в среднем начинает расти. В течение испытаний наблюдаются периоды, когда возрастание сопротивления сменяется его спадом, иногда почти до первоначальных величин (на рис. 2а это участок в окрестности $n_{ц} = 10 \cdot 10^4$ циклов).

Критерием предельного состояния контакта считается существенный устойчивый рост его электрического сопротивления. Интервал времени T от начала эксперимента до наступления предельного состояния принимается за величину ресурса контактного соединения. Средние значения ресурса приведены в табл. 3. Ввиду указанных выше особенностей случайного процесса $R(t)$ фиксация критического состояния контакта и соответственно величина ресурса определяются с большой погрешностью, достигающей до 50%.

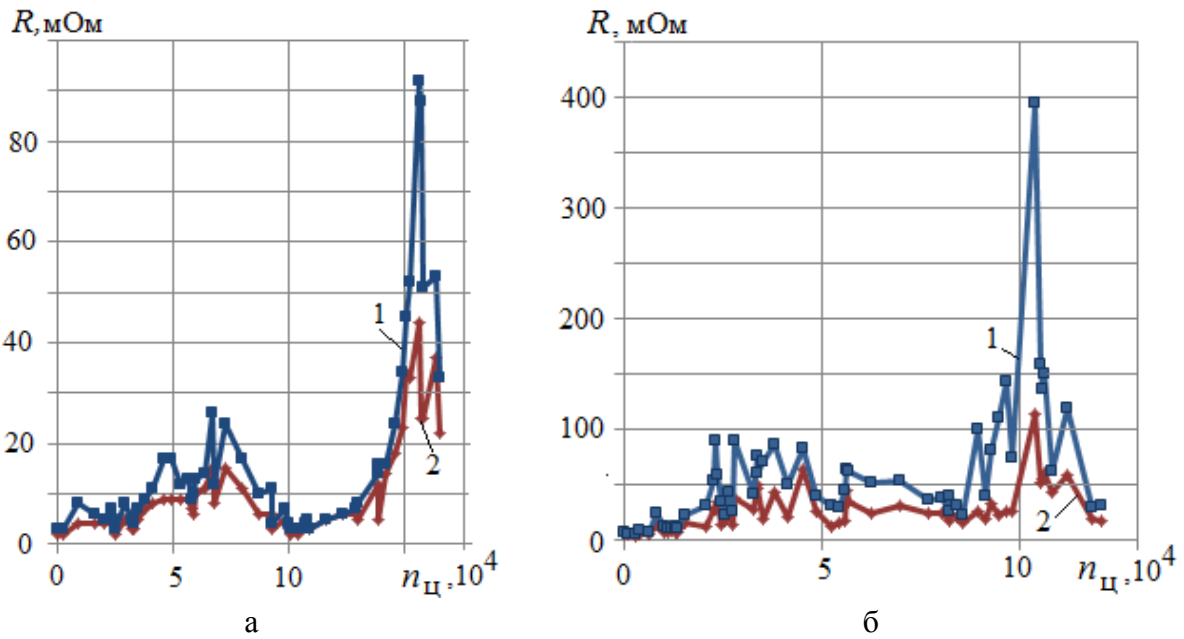


Рис. 2. Типичные реализации случайного процесса $R(t)$:
 а – $N = 1,4$ Н; $A = 18$ мкм; б – $N = 0,5$ Н, $A = 12$ мкм.
 Линии 1 – максимальные значения; линии 2 – минимальные

Таблица 3. Значения ресурса контактного соединения $N_i - N_i$ для различных режимов испытаний

Амплитуда A , мкм	Нагрузка N , Н	
	0,5	1,4
12	$0,6 \cdot 10^5$ (D)	-
18	$0,6 \cdot 10^5$ (C)	$1,5 \cdot 10^5$ (E)

Таблица 4. Среднее относительное время пребывания реализаций случайного процесса $R(t)$ над критическим уровнем

Амплитуда A , мкм	Нагрузка N , Н	
	0,5	1,4
12	0,6 (D)	-
18	0,8 (C)	0,11 (E)

Таблица 5. Среднее число циклов до первого превышения функцией тренда случайного процесса $R(t)$ критического уровня

Амплитуда A , мкм	Нагрузка N , Н	
	0,5	1,4
12	$0,30 \cdot 10^5$ (D)	-
18	$0,15 \cdot 10^5$ (C)	$1,5 \cdot 10^5$ (E)

Примечание: в табл. 3–5 буквами в скобках обозначены точки на карте режимов фреттинг-изнашивания (см. рис. 1), соответствующие данному режиму

Из рис. 1 видно, что все три режима испытаний соответствуют наименее желательной области ограниченного проскальзывания. Однако и в этом случае величина ресурса исследованных контактных соединений не одинакова. Из табл. 3 следует, что величина ресурса контактного соединения в данных испытаниях увеличивается с ростом нормальной нагрузки. Зависимости величины ресурса контактного соединения от амплитуды тангенциального смещения в данных экспериментах достоверно установить не удалось.

В связи с отмеченными трудностями достоверного определения ресурса контактного соединения, предлагаем еще два временных параметра, характеризующих износостойкость контакта в условиях фреттинг-изнашивания.

Первый критерий – среднее относительное время пребывания реализаций случайного процесса $R(t)$ над некоторым критическим уровнем за время испытаний (отношение времени, в течение которого величина $R(t)$ превышала критический уровень, к общей длительности испытаний). Вторым критерий – средняя продолжительность промежутка времени (или среднее число циклов) от начала испытаний до первого превышения функцией тренда случайного процесса $R(t)$ некоторого критического уровня. Очевидно, что более высокой износостойкости соответствует меньшая величина первого критерия и большая величина второго. Результаты представлены в табл. 4 и 5. Критический уровень сопротивления контакта условно принят равным десятикратному значению данной величины в начале испытаний.

Как следует из табл. 4 и 5, износостойкость контакта, оцениваемая как по первому, так и по второму предложенным критериям, безусловно, повышается с увеличением контактной нагрузки и несколько уменьшается с увеличением амплитуды тангенциальных смещений.

Заключение. Результаты экспериментального исследования единичного контакта по схеме шар – плоскость при малых тангенциальных смещениях, соответствующих наименее желательному режиму фреттинг-изнашивания – режиму существенного проскальзывания – показали, что износостойкость контакта может быть повышена увеличением нормальной контактной нагрузки и уменьшением тангенциальных деформаций контакта. Следует заметить, что увеличение нормальной контактной нагрузки N при постоянной амплитуде тангенциальных смещений A эквивалентно увеличению диаметра площадки контакта $2a$ и отношения $2a/A$. С другой стороны, уменьшение амплитуды тангенциальных смещений при постоянной нормальной нагрузке также означает увеличение отношения $2a/A$. Таким образом, величина отношения $2a/A$ может служить критерием износостойкости контактного соединения в данных условиях.

Библиографический список

1. Измайлов, В.В. Жесткость контакта и его фреттингостойкость / В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2013. Вып. 6. С. 4-9.
2. Измайлов, В.В. Экспериментальное исследование фреттинг-изнашивания / В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин // Вестник тверского государственного технического университета: научный журнал. Тверь: ТвГТУ, 2013. № 1. Вып. 23. С. 48-59.
3. Madge, J.J. Numerical Modelling of the Effect of Fretting Wear on Fretting Fatigue: PhD Thesis / Madge Jason John. Nottingham: University of Nottingham, 2008. 197 p.
4. Vingsbo, O. On Fretting Maps / O. Vingsbo, S. Soderberg // Wear. 1988. V. 126. P. 131-147.
5. Vincent, L. Mechanisms and materials in fretting / L. Vincent, Y. Berthier, M.C. Dubourg, M. Godet // Wear. 1992. V. 153. P. 135-138.
6. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. М.: Мир, 1989. 510 с.
7. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.

УДК 621.891

О.В. Сутягин, М.В. Васильев
Тверской государственной технической университет

**КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ С ПОКРЫТИЯМИ.
ЧАСТЬ 1. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ**

Рассмотрены теоретические методы исследования контактного взаимодействия моделей неровностей шероховатых поверхностей с покрытиями применительно к изделиям машиностроения. Проведен обзор и систематизация существующих методов рассмотрения контакта сферического индентора с покрытием, моделирующим слой твердой смазки. Показана актуальность разработки моделей контактного взаимодействия поверхностей с покрытиями в условиях упругопластических деформаций.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, сферический индентор, твердые смазочные покрытия, упругопластические деформации.

**CONTACT INTERACTION OF ENGINEERING PRODUCTS SURFACES
WITH COATINGS. PART 1: ANALYTICAL METHODS OF THE THEORY
OF ELASTICITY**

Theoretical methods of contact interaction research of surface roughnesses models with coatings in respect to mechanical engineering products are considered. The review and arrangement of existing methods of consideration of spherical indenter contact with the layer modeling the solid lubricant is carried out. The urgency of models working out for a contact interaction of surfaces with coatings at elastoplastic deformation is shown.

Keywords: contact interaction, spherical indenter, solid lubricant coatings, elastoplastic deformations.

В современном машиностроении широкое применение находят покрытия различного назначения. Для повышения износостойкости поверхностей в условиях абразивного или эрозионного износа применяются твердые покрытия на основе нитридов (TiN , AlN , BN), карбидов (WC , CrC), оксидов (Al_2O_3 , Cr_2O_3), боридов (TiB_2), а также алмазные покрытия (кристаллические и алмазоподобные DLC). Для обеспечения работоспособности узлов трения в условиях, когда традиционные смазки неэффективны, применяются мягкие антифрикционные покрытия на основе мягких металлов (золото, индий, свинец, серебро), полимеров (политетрафторэтилен, полиимид), твердых смазочных материалов (графит, MoS_2 , WS_2) и различных композиционных составов на их основе [1]. Исследование фрикционного взаимодействия шероховатых поверхностей основывается на решениях контактных задач для моделей единичных неровностей, результаты которых возможно распространить на множественный контакт с учетом распределения неровностей по высоте и размерам [2, 3]. Теоретические исследования контактного взаимодействия с тонкими покрытиями проводятся, как правило, двумя основными методами – аналитическим, основанным на классических теориях

упругости и пластичности, и с помощью метода конечных элементов. Аналитические методы позволили получить ряд результатов по распределению напряжений и деформаций при внедрении различных штампов в двухслойную среду при упругом или пластическом деформировании покрытия с заданием различных граничных условий. Моделирование методом конечных элементов позволило рассмотреть контактное взаимодействие с покрытиями в условиях упругопластических деформаций.

Аналитические методы теории упругости. С позиций классической теории упругости задачи о внедрении различных штампов в двухслойную среду изучались многими авторами как в плоской, так и в осесимметричной постановке. Учитывая, что наиболее распространенной моделью единичной неровности является сферический сегмент, ограничим наше рассмотрение задачами о внедрении сферического индентора в упругое основание, имеющее относительно мягкое упругое покрытие. Под относительно мягким, согласно [3], понимают такое покрытие, для которого отношение модуля упругости покрытия к модулю упругости основания меньше 1. В большинстве исследований предполагается, что жесткий сферический индентор внедряется в покрытие под действием нормальной нагрузки. Материалы покрытия и основания однородны, сплошны, изотропны, а остаточные напряжения отсутствуют. Их напряженно-деформированное состояние описывается основными уравнениями линейной теории упругости. Контактующие поверхности гладкие, а силы трения на них равны нулю. Считается, что покрытие либо жестко скреплено с основанием, либо трение между основанием и покрытием (слоем) равно нулю.

В математическом плане эта контактная задача относится к задачам механики сплошных сред со смешанными граничными условиями для тел с покрытиями, общие методы решения которых основаны на интегральных преобразованиях (Фурье, Ханкеля) [3]. Проанализируем основные результаты исследований, посвященных данной проблеме.

W.T. Chen и *P.A. Engel* [4] рассмотрели контактную задачу теории упругости о вдавливании осесимметричного штампа в двухслойное и однослойное покрытия, сцепленные с полупространством. Задача рассматривалась для относительно мягких и относительно твердых покрытий и была преобразована в разработанный авторами общий приближенный метод, пригодный для реализации на ЭВМ.

Суть этого метода сводится к тому, что все граничные условия по напряжениям и деформациям, сформулированные для поставленной задачи, выполняются строго, за исключением условия соответствия формы поверхности штампа на границе раздела внутри площадки контакта радиуса ρ форме поверхности, возникающей под действием распределенного внутри этой площадки контактного давления, которое выполняется приближенно. При этом предполагается, что распределение давлений под штампом можно искать в виде

$$q(r) = G_1 t (p_0 q_0(r) + q_s(r)),$$

где $q(r)$ – распределение контактного давления под штампом в зависимости от радиальной координаты r ; G_1 – модуль сдвига покрытия (в обозначении авторов μ_1); t – отношение внедрения штампа к радиусу пятна контакта; p_0 – константа; $q_0(r)$ – распределение давлений, соответствующее аналогичному штампу, внедряющемуся в однородное полупространство; $q_s(r)$ – возмущающая функция.

Возмущающую функцию $q_s(r)$ предлагается аппроксимировать как

$$q_s(r) = \sum_{i=1}^n p_i q_i(r),$$

где $q_i(r)$, $i = 1 \dots n$ – базовые функции, которые могут определяться как

$$q_i(r) = \left(1 - \frac{r^2}{\rho^2}\right)^{i-\frac{1}{2}}, \quad i = 1 \dots n.$$

Значения t и p_i находят на основании минимизации отклонения формы и расположения поверхности, возникающей под воздействием давления $q(r)$, от формы и расположения штампа. При этом применяется интегральный метод наименьших квадратов и энергетический принцип Рейснера.

Проверка алгоритма проводилась решением задачи о вдавливании плоского в плане кругового штампа в относительно твердый упругий слой, сцепленный с упругим основанием. Результаты расчетов сравниваются с данными [5], полученными для этой же задачи, решенной методом «строгого» анализа. Относительная ошибка решений определялась как разница координат поверхности внутри площадки контакта, возникающей под воздействием контактного давления $q(r)$, и координат поверхности штампа, отнесенная к координатам поверхности штампа. Для одинаковых условий нагружения при использовании предлагаемого алгоритма относительная ошибка составила менее 10^{-10} , а для данных [5] – 0,17. Далее рассмотрено внедрение параболического штампа в упругое полупространство с однородным или двухслойным покрытием. Приводятся численные результаты для случаев мягких и твердых покрытий. Важным результатом явилось существенное отклонение распределения контактного давления от Герцевского для случаев твердых покрытий. При этом как для однослойных твердых покрытий (рис. 1, линия D), так и для двухслойных (рис. 1, линия B) максимум давлений не совпадает с центром, а смещается на периферию. В случае с мягкими двухслойными и однослойными покрытиями отклонение распределения контактного давления от Герцевского существенно меньше и его максимум остается в центре (рис. 1, линии A и C соответственно).

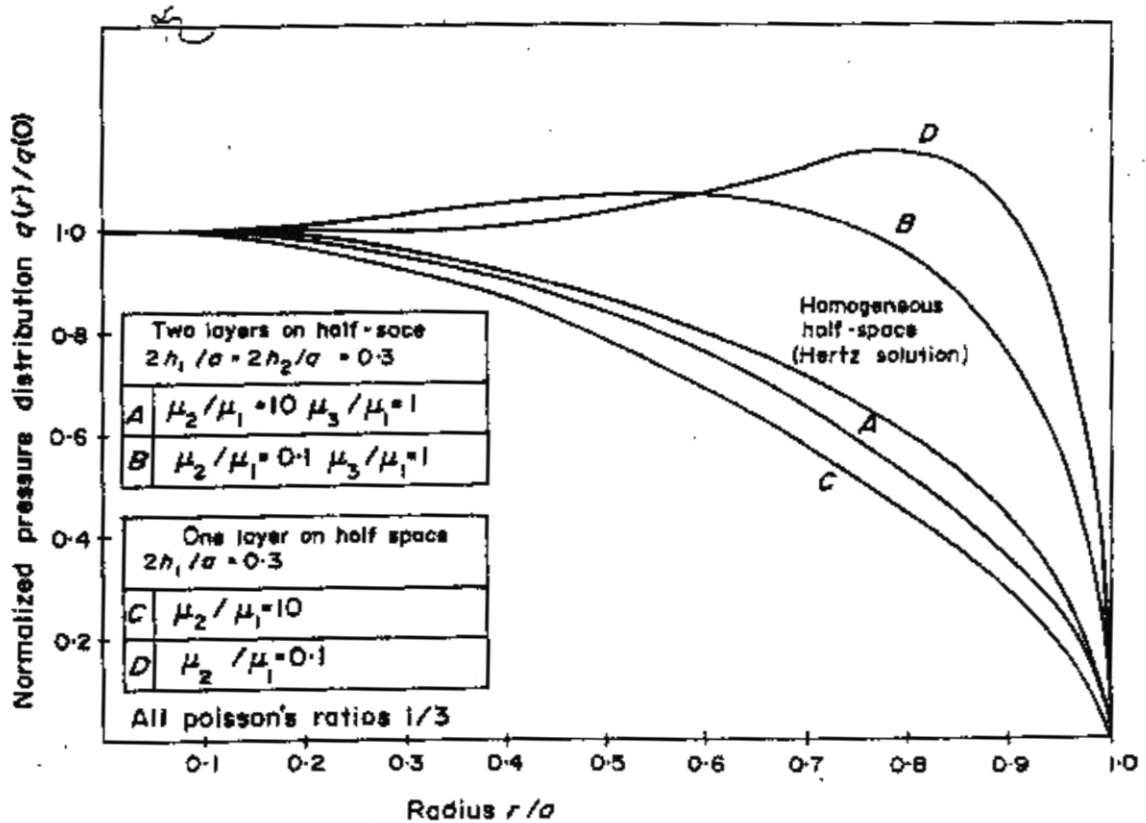


Рис. 1. Распределение нормального давления под параболическим штампом [4]

А.П. Макушкиным в работе [6] решается осесимметричная контактная задача теории упругости о вдавливании сферы в двухслойное основание, состоящее из верхнего низко модульного слоя и упругого полупространства. Рассматриваются 2 случая: слой, жестко сцепленный с упругим полупространством, и слой, свободно без трения лежащий на упругом полупространстве.

Используя метод интегрального преобразования Фурье-Бесселя, получены выражения для определения напряжений и перемещений в упругом слое в форме, доступной для практического использования. Результаты численного интегрирования полученных выражений для случая жестко сцепленного слоя были аппроксимированы с погрешностью не более 10% функциями вида (при $0,25 \leq \mu_1 \leq 0,5$; $0,25 \leq \mu_2 \leq 0,5$; $0,005 \leq E_1/E_2 \leq 1,0$):

$$\rho^3 = K \frac{3NR}{2E_1},$$

$$K = \frac{0,092}{\mu_1^{0,74}} \frac{\delta}{\rho} + \frac{E_1}{E_2} \frac{1 - \mu_2^2}{2} \quad \left(\text{при } 0 \leq \frac{\delta}{\rho} \leq 1,2 \right),$$

$$K = \frac{0,25}{\mu_1^{0,41} \mu_2^{0,03}} \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^{0,11} \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{0,32} \quad \left(\text{при } 1,2 < \frac{\delta}{\rho} \leq 5,5 \right),$$

$$K = \frac{1 - \mu_1^2}{2} \left(\text{при } 5,5 < \frac{\delta}{\rho} < \infty \right),$$

где ρ – радиус пятна контакта; δ – толщина покрытия; N – нагрузка на индентор; R – радиус индентора; E_1, E_2 – модули упругости слоя и полупространства соответственно; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона слоя и полупространства соответственно; K – функция, аппроксимирующая результаты численного интегрирования аналитического решения.

Отметим, что при решении задачи в качестве одного из граничных условий выбиралось распределение контактного давления, совпадающее с распределением по Герцу, что противоречит приведенным выше результатам работы [4].

M.J. Matthewson в работе [7] также рассматривал осесимметричный контакт с тонким относительно мягким покрытием, скрепленным с жестким полупространством. Полученные результаты заслуживают внимательного рассмотрения, так как предложенное аналитическое решение хорошо соответствует не только численному решению [8], но и серьезной экспериментальной проверке автора. Аналитическое решение удалось получить введением аппроксимации перемещений материала покрытия вне зоны контакта функцией в виде конечного степенного ряда относительно вертикальной координаты. Затем, рассматривая уравнение равновесия элементарного объема покрытия, проводится анализ напряженно-деформированного состояния внутри и вне зоны контакта и с использованием функции Бесселя первого порядка находится общее решение. Далее рассматриваются частные решения для сферы, конуса и общего профиля, поверхность которого может быть представлена в виде степенного ряда. Остановимся на анализе частного решения для сферического индентора. Рассматривая распределение касательных напряжений τ_0 на границе раздела покрытия и полупространства, автор показал их экстремальную чувствительность к величине коэффициента Пуассона (в обозначении автора ν) (рис. 2а). Значение τ_0 быстро растет со снижением сжимаемости покрытия ($\nu \rightarrow 0,5$). Это объясняется тем, что менее сжимаемый материал покрытия при его деформировании индентором должен больше перемещаться в радиальном направлении из зоны контакта, чем более сжимаемый материал. На рис. 2б представлена зависимость распределения касательных напряжений τ_0 на границе раздела покрытия и полупространства от относительной толщины покрытия (в обозначении автора h/a). Как видно из представленных данных, значение τ_0 быстро растет с уменьшением относительной толщины. На рисунках по оси абсцисс отложена относительная радиальная координата r/a . Важность результата состоит в том, что описывается напряженно-деформированное состояние адгезионного шва, по которому наиболее вероятно отслоение покрытия. На рис. 3а показано изменение нормальных к поверхности покрытия деформаций в зависимости от

относительной радиальной координаты при различных значениях коэффициента Пуассона. Как видно из этого рисунка, по полученным автором результатам, на границе контакта происходит выпучивание материала покрытия при его упругой деформации. Причем оно тем больше, чем больше ν . Рис. 3б иллюстрирует влияние ν на распределение нормальных напряжений. Отрицательные значения нормальных деформаций и контактных давлений связаны с выбором автором ориентации оси z в направлении, противоположном внедрению индентора.

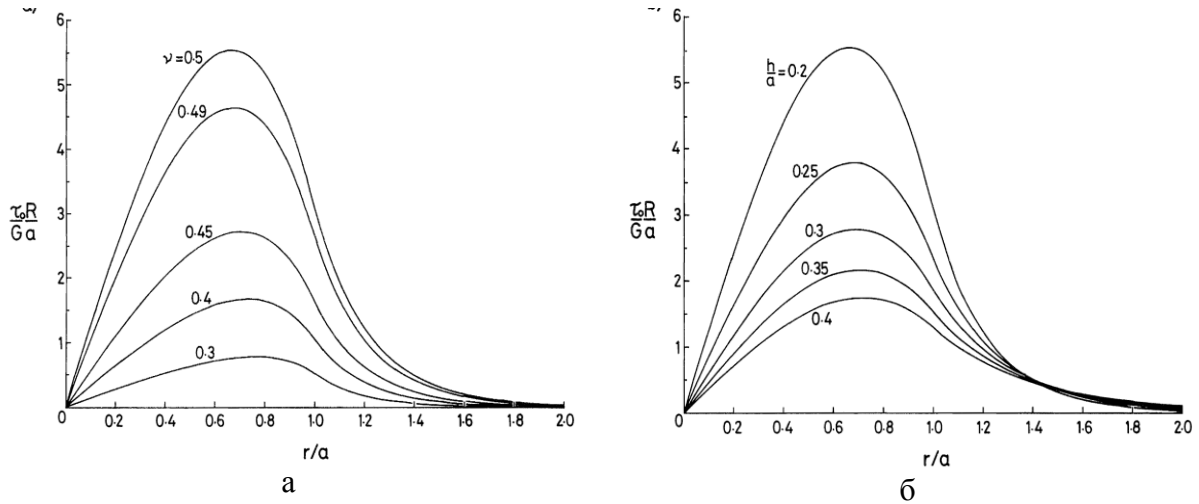


Рис. 2. Изменение напряжений τ_0 на границе раздела [7]:
а – для различных значений коэффициента Пуассона; б – для различных значений относительной толщины покрытия

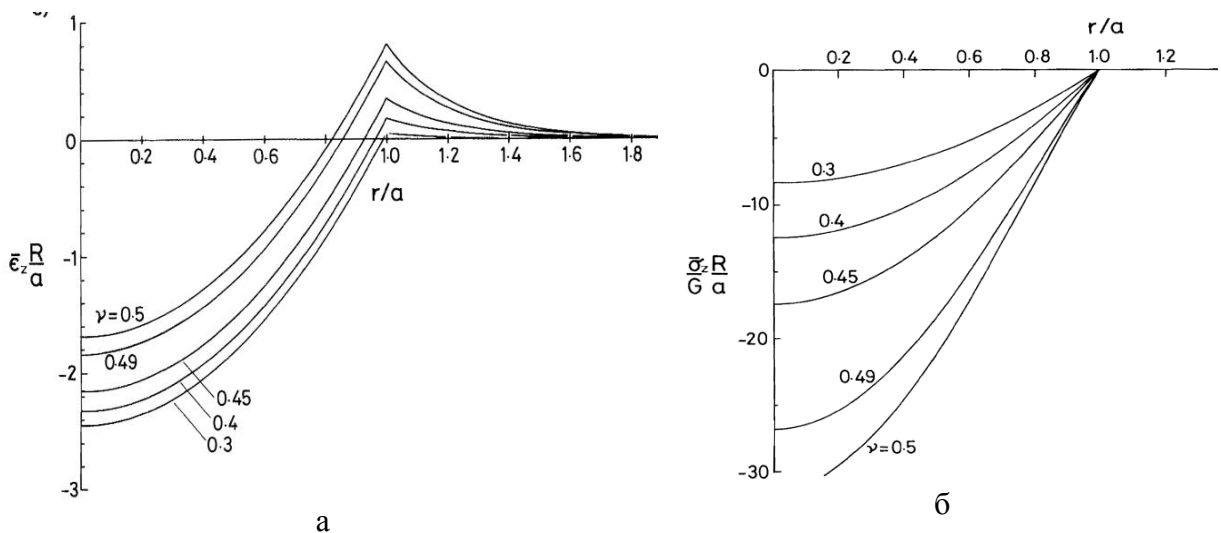


Рис. 3. Изменение нормальных деформаций (а) и нормальных напряжений (б) для различных значений коэффициента Пуассона [7]

Задаваемые на границе раздела условия, определяющие связь слоя с упругим полупространством в формулировках: слой жестко сцеплен с

упругим полупространством или слой свободно без трения лежит на упругом полупространстве, не достаточны для описания напряженно-деформированного состояния покрытий.

В связи с этим И.Г. Горячевой и Е.В. Торской [9] была рассмотрена задача осесимметричного нагружения двухслойного упругого основания при задании на границе раздела слоя и основания условий, допускающих относительное проскальзывание граничных точек вследствие неполного сцепления слоев. В предельных случаях сформулированные условия совпадают со случаями жесткого сцепления или отсутствием трения между слоем и основанием. Изучено влияние параметра, характеризующего степень сцепления покрытия с основанием, на распределение напряжений внутри двухслойного основания при различных относительных значениях механических и геометрических характеристик. Показано, что в случае мягких покрытий этот параметр оказывает слабое влияние на распределение максимальных касательных напряжений в слое и основании. При этом для относительно тонких покрытий влияние его увеличивается с уменьшением относительной толщины покрытия.

С.М. Айзенковичем с соавторами в работе [10] рассматривается внедрение жесткого сферического индентора в упругое основание с функционально-градиентным покрытием сложной структуры. Используя двухсторонний асимптотический метод, автор проводит анализ напряженно-деформированного состояния покрытия, модуль упругости которого является непрерывной гладкой немонотонной функцией, первая производная которой изменяет свой знак конечное число раз по глубине покрытия. Исследован случай более жесткого и менее жесткого покрытия. Однако рассмотренные в работе [10] законы изменения модуля упругости покрытия по толщине не могут быть применимы для мягких покрытий, моделирующих твердосмазочные слои, для которых градиентное уменьшение механических свойств происходит на поверхности и в адгезионных связях с основанием.

Е.В. Торской в работе [11] рассматривается контакт осесимметричного шероховатого сферического индентора и двухслойного упругого основания. Шероховатость индентора моделируется периодической системой инденторов, имеющих размеры меньшего порядка, а верхний слой двухслойного основания относительно твердые и относительно мягкие покрытия. Показано, что плотность контактов на микроуровне влияет на вид функции распределения давления на макроуровне. Полученные результаты целесообразно учитывать при анализе контактного взаимодействия шероховатых волнистых поверхностей и моделировании субмикрощероховатости неровностей контактирующих поверхностей.

Сравнение рассмотренных аналитических методов решения задачи контактного взаимодействия сферического индентора с относительно мягким покрытием при упругом контакте приведено в таблице.

Аналитические исследования контактного взаимодействия сферического индентора с относительно мягким покрытием

Авторы	Упр. покр.	Упр. основ.	Жест. основ.	Особенности полученных результатов
<i>Chen W.T.</i> с соавторами [4]	X	X		Исследованы мягкие и жесткие покрытия, одно и двухслойные, общий приближенный метод
Макушкин А.П. [6]	X	X		Аппроксимация результатов численного интегрирования аналитического решения
<i>Matthewson M.J.</i> [7]	X		X	Исследовано влияние коэффициента Пуассона покрытия
Горячева И.Г. с соавторами [9]	X	X		Исследовано влияние степени сцепления покрытия с основанием
Айзенкович С.М. с соавторами [10]	X	X		Исследовано влияние градиента модуля упругости покрытия
Торская Е.В. [11]	X	X		Решение для шероховатого индентора, внедряющегося в упругое покрытие

Заключение. Приведенный обзор представляет основные результаты, полученные различными авторами при исследовании контактной задачи теории упругости о внедрении сферического индентора в упругое основание, имеющее относительно мягкое упругое покрытие. Выполняемые в последнее время работы по исследованию контактного взаимодействия тел с покрытиями с использованием аналитических методов сосредоточены на усложнении моделей и совершенствовании численных методов решения задач [12].

Библиографический список

1. Holmberg, K. Coatings tribology. Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering / K. Holmberg, A. Matthews. Amsterdam – New York – Oxford – Shannon – Singapore – Tokyo. Elsevier science B.V. 1994. 457 p.
2. Демкин, Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. М.: Наука, 1970. 223 с.
3. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 478 с.
4. Chen, W.T. Impact and contact stress analysis in multilayer media / W.T. Chen, P.A. Engel // Int. J. Solid Structures. 1972. V. 8. P. 1257-1281.
5. Dhaliwal, R. Punch problem for an elastic layer overlaying an elastic foundation / R. Dhaliwal // Int. Engng Sci. 1970. V. 8. P. 273-288.
6. Макушкин, А.П. Исследование напряженно-деформированного состояния полимерного слоя при внедрении в него сферического индентора / А.П. Макушкин // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 2. С. 823-832.
7. Matthewson, M.J. Axi-symmetric contact on thin compliant coatings / M.J. Matthewson // J. Mech. Phys. Solids. 1981. V. 29. № 2. P. 89-113.
8. McCormick, J.A. Numerical solutions for general elliptical contact of layered elastic solids / J.A. McCormick // Tech. Rep. 78TR52. Mech. Technol. Dept. MTI. Latham, NY. 1978. 36 p.

9. Горячева, И.Г. Напряженное состояние двухслойного упругого основания при неполном сцеплении слоев / И.Г. Горячева, Е.В. Торская // Трение и износ. 1998. Т. 19. № 3. С. 289-296.

10. Айзенкович, С.М. Контактные задачи для упругих оснований с функционально-градиентными покрытиями сложной структуры / С.М. Айзенкович, Л.И. Кренин, И.С. Трубчик // Известия Саратовского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2009. Т. 9. Вып. 4. Ч. 2. С. 3-8.

11. Торская, Е.В. Моделирование фрикционного взаимодействия шероховатого индентора и двухслойного упругого полупространства / Е.В. Торская // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 2. С. 31-36.

12. Казаков, К.Е. Контактные задачи для тел с покрытиями / К.Е. Казаков // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2007. № 4(54). С. 176-196.

УДК 621.891

О.В. Сутягин, М.В. Васильев
Тверской государственной технической университет

**КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ С ПОКРЫТИЯМИ.
ЧАСТЬ 2. ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО
КОНТАКТА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Рассмотрены теоретические методы исследования контактного взаимодействия моделей неровностей шероховатых поверхностей с покрытиями применительно к изделиям машиностроения. Проведен обзор и систематизация существующих методов рассмотрения контакта сферического индентора с покрытием, моделирующим слой твердой смазки. Показана актуальность разработки моделей контактного взаимодействия поверхностей с покрытиями в условиях упругопластических деформаций.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, сферический индентор, твердые смазочные покрытия, упругопластические деформации.

**CONTACT INTERACTION OF ENGINEERING PRODUCTS SURFACES
WITH COATINGS. PART 2. THE APPROXIMATE ANALYSIS OF THE ELAS-
TOPLASTIC CONTACT BY THE FINITE ELEMENT METHOD**

Theoretical methods of contact interaction research of surface roughness models with coatings in respect to mechanical engineering products are considered. The review and arrangement of existing methods of consideration of spherical indenter contact with the layer modeling the solid lubricant is carried out. The urgency of models working out for a contact interaction of surfaces with coatings at elastoplastic deformation is shown.

Keywords: contact interaction, spherical indenter, solid lubricant coatings, elastoplastic deformations.

В первой части работы [1] были рассмотрены аналитические методы исследований контактного взаимодействия сферического индентора, моделирующего единичную неровность шероховатой поверхности, с позиций классической теории упругости. Однако упругие деформации не исчерпы-

вают всего спектра напряженно-деформированных состояний покрытия при нагружении. Проанализируем случаи пластического и упругопластического деформирования покрытия в процессе его контактного взаимодействия с жестким сферическим индентором.

Аналитические методы теории пластичности. Исследованию внедрения сферического индентора в пластически деформируемое покрытие посвящено значительно меньше работ, чем исследованию контактного взаимодействия покрытий при упругих деформациях.

Н.М. Алексеевым в работе [2] было рассмотрено вдавливание сферического индентора в бесконечно-протяженный слой пластического материала ограниченной толщины. Материал покрытия принимался жесткопластическим, а полупространство и индентор считались жесткими. Задача решалась приближенным энергетическим методом, основанным на экстремальных принципах теории пластичности. Определено, что усилие, необходимое для внедрения сферы, можно определить выражением

$$\frac{q}{\sigma_s} = 1,4 + \frac{1+2f_k}{2} \frac{\sqrt{2Ra}}{\delta} + \frac{\delta}{\sqrt{2Ra}} - 1,5 \sqrt{\frac{a}{\rho}}, \quad (1)$$

где q – среднее давление под индентором; σ_s – предел текучести материала покрытия; f_k – коэффициент контактного трения; R – радиус индентора; a – глубина пластического внедрения сферического индентора; δ – толщина покрытия; ρ – радиус пятна контакта.

Выражение (1) справедливо при выполнении условия

$$\sqrt{Ra(1+2f_k)} \geq \delta. \quad (2)$$

При невыполнении условия (2) среднее давление под индентором постоянно и равно твердости материала покрытия.

В.В. Измайловым и В.М. Саватеевым в работе [3] был рассмотрен контакт жесткого сферического индентора с пластическим покрытием на упругом основании. По предложенному авторами закону распределения давления на границе раздела основание-покрытие были найдены упругие перемещения основания от этой нагрузки. Глубина пластического внедрения индентора в покрытие определялась по соотношению (1). Общее внедрение индентора при минимальном контактном трении определяется из соотношения

$$w = a \left(1 + \frac{2(1-\mu_2^2)\sigma_s}{E_2} \left(2 \sqrt{\frac{R}{a}} + \frac{R}{\delta} + \frac{\delta}{a} - \sqrt{2} \right) \right),$$

где w – общее внедрение индентора; a – глубина пластического внедрения индентора в покрытие.

Далее, рассматривая напряженное состояние основания от нагрузки, создаваемой принятым законом распределения давления на границе раздела основание – покрытие, авторы исследуют зарождение и развитие пластических деформаций в материале основания. В данной работе не учиты-

валось, что на границе раздела основание-покрытие нагрузка распределяется и за пределы проекции площадки контакта на основание.

Приближенный анализ упругопластического контакта. Наиболее общим случаем контакта шероховатых тел является упруго-пластический. Однако провести строгий анализ упругопластической контактной задачи для внедрения сферического индентора в покрытие до настоящего времени не удалось. Поэтому опишем приближенный анализ этого случая.

В работе [4] А.П. Макушкин и И.В. Крагельский рассмотрели упругопластический контакт индентора с покрытием как упругий контакт сферы радиусом r с остаточным пластическим отпечатком радиуса r_1 . Отпечаток был образован в полимерном покрытии в результате его упругопластического деформирования. Авторами получены выражения для упругой и пластической составляющих внедрения при упругопластическом деформировании покрытия в виде

$$a_y = \frac{3K}{2E_1} \sqrt{\pi NHB},$$

$$a_{\text{п}} = \frac{N}{2\pi RHB} - 2,66 \frac{K}{E_1} \sqrt{NHB},$$

где a_y – упругая составляющая внедрения; $a_{\text{п}}$ – пластическая составляющая внедрения; HB – твердость покрытия по Бринелю; N – нагрузка на индентор; K – функция, аппроксимирующая результаты численного интегрирования аналитического решения [5].

Такой же подход был успешно использован ранее для приближенного решения задачи об упругопластических деформациях металлов в работе [6]. Однако в работе [4] не учтена зависимость давления под индентором при пластическом контакте сферического индентора с покрытием от относительной толщины покрытия, установленная в [2], поэтому ее результаты можно рассматривать только для относительно толстых покрытий.

Моделирование методом конечных элементов. Как отмечалось выше, исследование внедрения сферического индентора в покрытие при его упругопластических деформациях с использованием аналитических методов затруднено, поэтому для решения существенно нелинейных задач единичного контактного взаимодействия с покрытием применяется метод конечных элементов (МКЭ).

В обзорной работе [7] *Qian R. Sheng* подчеркивает, что в исследовании деформирования тонких покрытий наибольшими преимуществами обладает МКЭ. Данный метод позволяет решить задачу с учетом нелинейностей материала, больших перемещений, больших деформаций, контактных нелинейностей, характерных для деформирования тонких покрытий. Отдельно отмечается возможность и необходимость использования в расчетах моделей полимерных материалов, которые учитывают вязкопластические свойства, большие пластические деформации и упрочнение, зависимость механических свойств от температуры.

Также МКЭ находит применение и в исследовании упругого деформирования покрытий. В работе [8] произведено моделирование неоднородного двухслойного покрытия в упругой области. Неоднородность одного слоя покрытия смоделирована периодическим набором включений в форме сегментов. Показано влияние размеров сегментов и их жесткости на напряженно-деформированное состояние двухслойного покрытия.

В работе [9] на основе энергетического подхода по результатам конечно-элементного исследования предложена зависимость для определения нагрузки N при упругом деформировании в виде

$$N = CE_2a^p,$$

где C и p – константы, учитывающие упругие свойства материалов, радиус индентора и толщину покрытия; E_2 – модуль упругости полупространства.

Выражения для определения C и p достаточно громоздки и приведены в [9].

Пожалуй, первой работой с применением МКЭ, посвященной анализу внедрения сферического индентора в покрытие при его упругопластических деформациях, было исследование Ф. Кеннеди и Ф. Лин [8]. Расчеты характеристик контакта были проведены для двух сочетаний механических свойств основания и покрытия. Однако из-за грубости расчетной модели точность полученных данных не сопоставима с результатами, получаемыми с использованием современных программных продуктов и вычислительных средств.

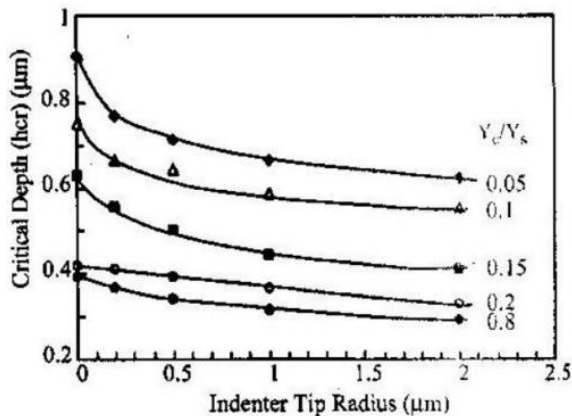


Рис. 1. Критическая глубина внедрения, при которой влияние основания на величину внедрения менее 5%, как функция радиуса индентора [11]

Подробное исследование влияние основания на упругопластическое деформирование мягкого покрытия проведено в [11]. Предполагалось, что материал покрытия изотропный, идеально упругопластический, покрытие жестко сцеплено с основанием и контактное трение отсутствует. Результаты исследований, представленные на рис. 1, показывают, что влияние основания на внедрение индентора в покрытие возрастает с уменьшением отношения пределов текучести покрытия и основания.

Обнаружено двойное влияние основания на пластическое деформирование покрытия: основание не только способствует появлению и развитию пластических деформаций в покрытии, но и увеличивает выпучивание материала покрытия вокруг индентора по сравнению с выпучиванием в сплошном теле из материала покрытия (рис. 2).

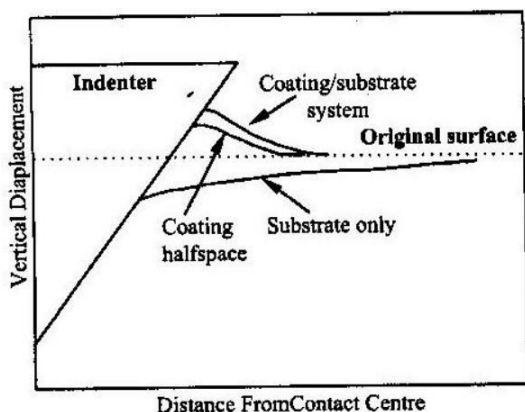


Рис. 2. Профили деформированных поверхностей системы покрытие/основание, а также отдельно полупространств из материалов покрытия и основания, показывающие возрастающее выпучивание покрытия на более твердом основании [11]

значение эквивалентных напряжений по Мизесу в области под площадкой контакта по всей глубине покрытия. Показано, что существует критическое значение таких напряжений, при превышении которых износ резко возрастает.

Исследование содержит 2 части. Первая часть заключалась в экспериментальном определении износа при трении сферического индентора по тонкому золотому покрытию. Эксперименты проводились при различных значениях первоначального внедрения индентора.

Вторая часть заключалась в определении с помощью МКЭ средних напряжений при соответствующих экспериментах первоначальных внедрениях. Исходные данные задавались таким образом, чтобы численная модель максимально соответствовала условиям эксперимента. Использовалась упругопластическая модель материала со степенной зависимостью и изотропным упрочнением. Покрытие считалось жестко сцепленным с основанием.

В результате установлено, что износ резко возрастает при достижении средними напряжениями предела текучести покрытия. При превышении данной величины между напряжениями и износом наблюдается степенная зависимость. Предложено соотношение для определения величины износа для модели единичного контакта. Показано, что с учетом поправочных коэффициентов и для условий, при которых выполнены расчеты и эксперименты, износ за пределом текучести пропорционален средним напряжениям в степени 6,45.

Несмотря на преимущества МКЭ, моделирование на его основе связано с неизбежными погрешностями. Погрешности расчета вызваны несовершенством сетки конечных элементов – точность расчетов увеличивается с уменьшением размеров КЭ, особенно чувствительна к размеру и числу

В ряде других работ результаты, полученные с помощью МКЭ, в той или иной степени совпадают с результатами, полученными в [11].

В работе [12] проведено экспериментальное исследование износа тонких золотых покрытий от средних напряжений на контакте. Для сферической модели единичной неровности с использованием МКЭ была проведена оценка напряженно-деформированного состояния и средних напряжений на контакте. Под средними напряжениями в работе понимается среднее

КЭ контактная область. Модели, описывающие поведение реального материала в упругопластической области, также являются приближенными. Учет дополнительных факторов, таких как трение в зоне контакта, упругопластическое деформирование основания существенно усложняют расчеты и увеличивают их погрешность. Сравнительная характеристика конечно-элементных моделей, использованных в перечисленных работах, приведена в таблице.

Сравнительная характеристика конечно-элементных моделей

Авторы	Особенности конечно-элементного разбиения	Модель материала покрытия	Дополнительные учтенные факторы
Чебаков М.И. с соавторами [9]	-	Упругое покрытие на упругом основании	Смоделирована неоднородность покрытия
<i>Kurapati S.N.V.R.K.</i> [10]	Ступенчатое изменение размеров КЭ. Сетка сгущена в области контакта	Упругое покрытие на упругом основании	Учтено трение в контактной зоне
<i>Panich N.</i> с соавторами [11]	-	Идеально упругопластическое покрытие на идеально упругопластическом основании	-
<i>Tangena A.G.</i> с соавторами [12]	Ступенчатое изменение размеров КЭ. Сетка грубая, но сгущена в области контакта	Степенная модель упругопластического деформирования для покрытия и основания с изотропным упрочнением	Учтено трение в контактной зоне

Получаемые МКЭ частные решения самостоятельно не обладают достаточной значимостью, поэтому требуют обобщения их результатов. В работе [10] отмечено, что моделирование деформирования покрытия МКЭ проведено в большом количестве работ. Меньше работ посвящены исследованию зависимости внедрения от нагрузки. Расчеты с использованием МКЭ, описывающие взаимосвязь внедрения в упругопластическое покрытие с нагрузкой, отсутствуют вовсе.

Заключение. Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию контактного взаимодействия сферического индентора с мягким покрытием, проведенных как с использованием аналитических методов, так и с использованием МКЭ, каждое из предлагаемых решений имеет определенные упрощения и самоограничения. Особенно это относится к результатам, полученным для упругопластического деформирования покрытия. Поэтому разработка таких моделей контактного взаимодействия актуальна.

Библиографический список

1. Сутягин О.В. Контактное взаимодействие поверхностей изделий машиностроения с покрытиями. Часть 1. Аналитические методы теории упругости / О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2014. Вып. 7. С. 48-56.
2. Алексеев, Н.М. Вдавливание сферического индентора в бесконечно-протяженный слой пластического материала ограниченной толщины / Н.М. Алексеев // Контактное взаимодействие твердых тел, расчет сил трения и износа. М.: Наука. 1971. С. 105-112.
3. Измайлов, В.В. Контакт единичной неровности с пластическим покрытием на упругом основании / В.В. Измайлов, В.М. Саватеев // Механика и физика контактного взаимодействия: межвуз. сб. науч. тр. Калинин: КГУ, 1976. С. 43-50.
4. Макушкин, А.П. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей через полимерный слой / А.П. Макушкин, И.В. Крагельский // Трение и износ. 1986. Т. 7. № 1. С. 5-15.
5. Макушкин, А.П. Исследование напряженно-деформированного состояния полимерного слоя при внедрении в него сферического индентора / А.П. Макушкин // Трение и износ. 1984. Т. 5. № 2. С. 823-832.
6. Нетягов, П.Д. Упругопластический контакт единичной неровности / П.Д. Нетягов, В.В. Измайлов // Известия ВУЗов. М.: Машиностроение. 1975. № 5. С. 16-20.
7. Sheng, Q.R. Mechanics and tribology of thin coatings (films) / Q.R. Sheng // Mechanics of Contact and Lubrication, ME5656. 2009. 18 p.
8. Кеннеди, Ф. Упругопластическое вдавливание в слоистую среду / Ф. Кеннеди, Ф. Лин // Теоретические основы инженерных расчетов. 1974. № 2. С. 17-24.
9. Чебаков, М.И. Моделирование контактного взаимодействия тел с неоднородными по глубине механическими свойствами при наличии трения в зоне контакта / М.И. Чебаков, Е.М. Колосова, А.В. Наседкин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 1252-1255.
10. Kurapati, S.N.V.R.K. Elastic-plastic indentation deformation in homogeneous and layered materials: finite element analysis / S.N.V.R.K. Kurapati. University of Kentucky master's theses, 2008. P. 576.
11. Panich, N. Effect of penetration depth on indentation response of soft coatings on hard substrates: a finite element analysis / N. Panich, Y. Sun // Surface and coating technology. 2004. № 182. P. 342-350.
12. Tangena, A.G. The role of plastic deformation in wear of thin films / A.G. Tangena, P.J.M. Wijnhoven, E.A. Muijderman // Journal of tribology. 1988. V. 110. P. 602-608.

УДК 621.891:531.43

Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов, В.Г. Прохоров
Тверской государственный технический университет

РАСЧЕТ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В статье рассмотрен расчет упругопластической контактной деформации на примере соединения полого вала и втулки, при этом деформация микровыступов сопрягаемых деталей принимается упругопластической.

Ключевые слова: контактная деформация, соединение двух деталей, модель выступов шероховатости, натяг.

CALCULATION OF ELASTOPLASTIC CONTACT DEFORMATION

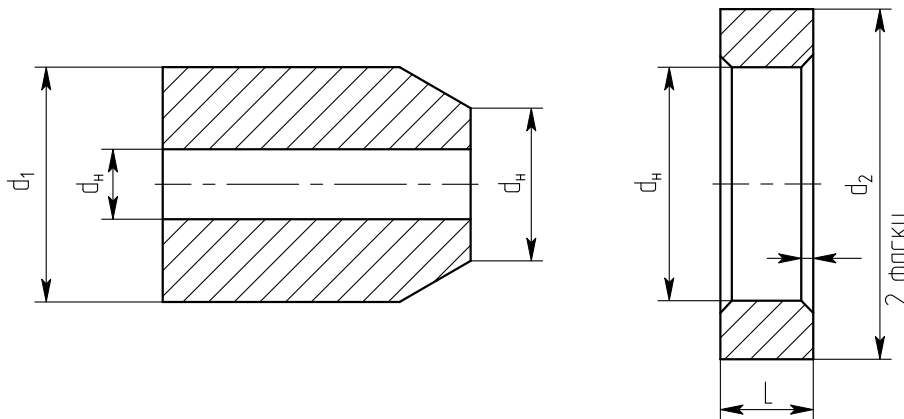
The article describes the calculation of elastoplastic deformation of the contact on the example of a couple of the hollow shaft and the sleeve. Deformation of asperities of contacting parts is assumed to be elastoplastic.

Keywords: contact deformation, the connection of two parts, the model of the roughness asperities, tightness.

В основу расчета положена сферическая модель выступов шероховатости. Введем ограничения: плотность распределения выступов достаточно велика, а их вершины равномерно распределены по цилиндрической поверхности; возникающее при сборке радиальное давление в зоне контакта сопрягаемых поверхностей рассматривается как равномерно распределенная осесимметричная нагрузка; общая деформация сопрягаемых деталей принимается упругой, следовательно, подчиняется решению Ляме; деформация микровыступов сопрягаемых поверхностей является упругопластической; взаимное влияние выступов незначительно; волнистость и погрешность формы отсутствуют.

Рассмотрим случай, когда соединение состоит из полого вала и втулки (рисунок). Разность между наружным диаметром вала и внутренним диаметром втулки до сборки определяет расчетный натяг Δ . В процессе сборки деталей произойдет растяжение втулки на величину Δ_a и одновременно сжатие втулки на величину Δ_b , причем

$$\Delta = \Delta_a + \Delta_b. \quad (1)$$



Образцы для запрессовки

Из определения напряжений и перемещений в толстостенных полых цилиндрах (задача Ляме) известны зависимости [1]:

$$\Delta_a = q \cdot d \cdot \frac{C_a}{E_a}, \quad \Delta_b = q \cdot d \cdot \frac{C_b}{E_b}, \quad (2)$$

где q – среднее номинальное расчетное давление на поверхности сопряжения цилиндрических деталей, возникающее под влиянием натяга.

Выражение (1) справедливо в случае контактирования идеально гладких цилиндрических поверхностей. В действительности поверхности деталей всегда имеют шероховатость.

При сборке произойдет внедрение выступов более твердой поверхности в выступы менее твердой, вследствие этого первоначальный расчетный натяг уменьшится на величину полного сближения a . Следовательно, в рассматриваемом случае вместо формулы (1) имеем

$$\alpha = 0,5 \cdot [\Delta - (\Delta_a - \Delta_b)]. \quad (3)$$

Представим абсолютное сближение a в виде

$$\alpha = K_{cn} \cdot \varepsilon \cdot R_{max}, \quad (4)$$

где K_{cn} – коэффициент, зависящий от способа получения соединений с натягом; при сборке под прессом $K_{cn} = 2^{1/v}$; при сборке тепловым способом (нагревом втулки или охлаждением вала) $K_{cn} = 1$.

После подстановки соотношений (2) и (4) в (3), получаем:

$$\varepsilon = \frac{1}{2^{1/v} \cdot R_{max}} \cdot \left[\Delta - \frac{b \cdot d \cdot P_{кр} \cdot \varepsilon^{v-1} \cdot \kappa_P \cdot \left(\frac{C_a}{E_a} + \frac{C_b}{E_b} \right)}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot R_{max}} \right]. \quad (5)$$

Значение ε при заданных параметрах соединения (первоначальный расчетный натяг Δ , размеры и материал соединенных деталей, параметры шероховатости сопрягаемых поверхностей) находятся решением уравнения (5) методом последовательных приближений.

Несмотря на внешне простой вид уравнения (5), пользоваться им при расчетах весьма неудобно. Упрощенное решение получается на основе зависимостей, в которых основные характеристики контакта шероховатых поверхностей представлены в функции математического ожидания степени нагружения выступов $\bar{\kappa}$.

$$\kappa_h = \frac{2^{4 \cdot v - 6 - \frac{1}{v}} \cdot \left[8 \cdot r \cdot \Delta - v \cdot d_{крн}^2 \cdot (\bar{\kappa}_h + \bar{\kappa}_h^{1/2}) \right] \cdot \pi \cdot r^{v-1} \cdot R_{max}^v}{b \cdot v \cdot P_{кр} \cdot d \cdot \left[v \cdot d_{крн}^2 \cdot (\bar{\kappa}_h + \bar{\kappa}_h^{1/2}) \right]^{v-1} \cdot \left(\frac{C_a}{E_a} + \frac{C_b}{E_b} \cdot \kappa_{cn} \right)}, \quad (6)$$

где κ_h – математическое ожидание степени нагружения выступов цилиндрической шероховатой поверхности. При выводе (6) учтено, что $\alpha = \varepsilon \cdot R_{max}$.

Уравнение (6), так же как и уравнение (5), решается методом последовательных приближений.

На основе рассчитанного сближения определяется фактическая площадь контакта, контурное давление, в том числе и оценка несущей способности сопрягаемых деталей [4].

Библиографический список

1. Ишлинский, А.Ю. Осесимметричная задача теории пластичности и проба Бригелля / А.Ю. Ишлинский // Прикладная математика и механика. 1944. Т. 8. С. 201-224.
2. Матлин, М.М. Исследование трения в соединениях с натягом: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.М. Матлин. Калинин, 1981.
3. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. М.: Машиностроение, 1986. С. 220.
4. Миронов, В.А. Расчет сил трения сопряженных деталей в соединениях с натягом / В.А. Миронов, А.А. Ланков, Г.И. Рогозин. Тверь: ТГТУ, 2004. 120 с.

УДК 621.891:531.43

Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов
Тверской государственной технической университет

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

В статье изложен анализ влияния различных факторов на основные характеристики упругопластического контакта цилиндрических шероховатых поверхностей в соединениях с натягом.

Ключевые слова: упругопластический контакт, расчетный натяг, фактическая площадь контакта, степень нагружения.

FACTORS GOVERNING ELASTOPLASTIC CONTACT CHARACTERISTICS

The article describes the analysis of the influence of various factors on the basic characteristics of elastoplastic contact of rough surfaces in cylindrical joints with interference.

Keywords: elastoplastic contact, the estimated interference, the actual contact area, loading degree.

На основании работ [1, 2] проанализируем влияние различных факторов на основные характеристики упругопластического контакта цилиндрических шероховатых поверхностей в соединениях с натягом.

Рассмотрим первую группу факторов, в которую выделим размеры соединяемых деталей dh , d_1 , d_2 и расчетный натяг Δ . С увеличением dh , d_1/dh , dh/d_2 при постоянном натяге давление в зоне контакта сопряженных поверхностей уменьшается, что в свою очередь приводит к уменьшению сближения ε , фактической площади η_r и математического ожидания степени нагружения выступов $\bar{\kappa}_h$. Увеличение натяга Δ при постоянных значениях dh , d_1/dh , dh/d_2 вызывает рост значений ε , η_r , q и $\bar{\kappa}_h$.

Ко второй группе факторов отнесем параметры b , ν , r и R_{max} , характеризующие способы обработки и шероховатость сопрягаемых поверхностей.

Рост параметра b соответствует уменьшению шероховатости [3, 4]; при этом фактическая площадь контакта η_r возрастает, а сближение ε снижается вследствие увеличения плотности распределения выступов и соответственно уменьшения усилия в контакте единичных выступов; по той же причине математическое ожидание степени нагружения выступов $\bar{\kappa}_h$ уменьшается. С ростом параметра ν , что соответствует увеличению шероховатости [1, 2], относительная фактическая площадь контакта η_r снижается, а сближение ε и математическое ожидание степени нагружения выступов $\bar{\kappa}_h$ увеличивается, так как при этом плотность распределения вершин выступов в верхних слоях уменьшается; с увеличением ε фактический натяг в зоне контакта сопряженных поверхностей уменьшается, что приводит к снижению давления q .

С увеличением радиуса кривизны вершин выступов r снижается высота шероховатости [5], относительная фактическая площадь контакта η_r и сближение ε возрастают. Рост r происходит при фиксированных параметрах b и ν , что приводит к уменьшению плотности распределения выступов на всех уровнях, следовательно, к увеличению нагрузок на единичных контактах; с ростом ε фактический натяг уменьшается, что приводит к уменьшению давления q ; математическое ожидание степени нагружения выступов, несмотря на рост относительного сближения, уменьшается, так как критическая нагрузка возрастает пропорционально величине r^2 .

С увеличением максимальной высоты неровностей R_{max} сближение ε и фактическая площадь контакта η_r уменьшаются; при этом абсолютная величина сближения α возрастает; при $r = const$ математическое ожидание степени нагружения выступов $\bar{\kappa}_h$ увеличивается, фактический натяг с ростом α уменьшается, что приводит к снижению давления q .

В третью группу факторов включим механические характеристики материала соединяемых деталей

С увеличением твердости материала H фактическая площадь контакта η_r и сближение ε уменьшаются, так как уменьшается пластическая составляющая сближения; фактический натяг с уменьшением ε возрастает, что приводит к росту давления q ; математическое ожидание степени нагружения выступов $\bar{\kappa}_h$ уменьшается, это объясняется снижением ε и увеличением критической нагрузки, которая возрастает пропорционально H^3 .

Увеличение модуля упругости материала E приводит к снижению относительной фактической площади контакта η_r и сближения ε , что объясняется уменьшением упругой составляющей сближения; давление q возрастает, так как фактический натяг с уменьшением ε растет. Математическое ожидание степени нагружения выступов $\bar{\kappa}_h$ увеличивается в связи с тем, что на его величину более существенное влияние оказывает уменьшение критической нагрузки, которая изменяется обратно пропорционально

величине E^2 , чем снижение ε . Качественные результаты выполненного анализа приведены в таблице.

Изменение основных характеристик упругопластического контакта цилиндрических шероховатых поверхностей при возрастании определяющих факторов

	Определяющие факторы								Механические характеристики материалов	
	Размеры деталей				Параметры шероховатости					
	Δ	d_h	d_1/d_h	d_h/d_2	b	ν	r	R_{max}	H	E
$\bar{\kappa}_h$	+	-	-	-	-	+	-	+	-	-
ε	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-
η_r	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-
q	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+

Примечание: + увеличение; - уменьшение.

Описанный характер влияния различных факторов на основные характеристики упругопластического контакта шероховатых поверхностей в целом согласуются с данными, содержащимися в работах [3] и [4].

Условные обозначения: d_h – диаметр сопряжения деталей в соединениях с натягом; d_1 – внутренний диаметр охватываемой детали; d_2 – внешний диаметр охватывающей детали; Δ – натяг; l – длина сопряженных деталей в соединениях с натягом; ε – сближение контактируемых поверхностей; η_r – фактическая площадь контакта; $\bar{\kappa}_h$ – математическое ожидание степени нагружения выступов; H – предельное давление текучести или предельная твердость; E – модуль упругости контактирующих деталей (индекс 1 относится к охватываемой детали, 2 – к охватывающей детали); b , ν – параметры кривой опорной поверхности профиля шероховатости; R_{max} – максимальная высота неровностей (расстояние от линии вершин до линии впадин).

Библиографический список

1. Рогозин, Г.И. Расчет упругопластической контактной деформации / Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов, В.Г. Прохоров // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2014. Вып. 7. С. 62-65.
2. Миронов, В.А. Расчет сил трения сопряженных деталей в соединениях с натягом / В.А. Миронов, А.А. Ланков, Г.И. Рогозин. Тверь: ТГТУ, 2004. 120 с.
3. Демкин, Н.Б. Качество поверхности контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
4. Нетягов, П.Д. Упругопластический контакт единичной неровности / П.Д. Нетягов, В.В. Измайлов // Известия вузов. М.: Машиностроение, 1975. № 5. С. 16-23.
5. Арсланов, Ф.Х. К вопросу прогнозирования деформаций при пластическом деформировании / Ф.Х. Арсланов // Материалы науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы развития машиностроительного комплекса Тверской области». Тверь: ТГТУ, 2001. С. 23-24.

УДК 621.793

Е.А. Памфилов
Брянский государственный технический университет,
Г.А. Пилюшина
Брянская государственная инженерно-технологическая академия

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассмотрены вопросы повышения надежности неподвижных соединений технологического оборудования за счет нанесения на функциональные поверхности металлических покрытий, предложены различные способы их выполнения. Даны рекомендации о режимах создания промежуточных герметизирующих слоев.

Ключевые слова: неподвижные разъемные соединения, герметичность, вибрация, изнашивание, контактная деформация, металлическое покрытие, работоспособность, износостойкость, аморфная структура.

WAYS TO INCREASE THE MOTIONLESS CONNECTIONS RELIABILITY

Problems of motionless connections reliability increase in manufacturing machinery are considered. The deposition of metal coatings on functional surfaces is proposed as the way to increase the motionless connections reliability. Various ways of coating are offered. The modes of creation of intermediate sealing layers are recommended.

Keywords: motionless separable connections, leaktightness, vibration, wear process, contact deformation, a metal coating, availability, wear resistance, amorphous structure.

В настоящее время в конструкциях машин и приборов широко используются неподвижные разъемные соединения, представляющие собой сопряжения, допускающие разборку и сборку узлов без объемного или поверхностного разрушения деталей, составляющих сборочную единицу.

К таким соединениям относятся уплотнительные элементы, детали арматуры и соединительные части трубопроводов, крепежные соединения, посадки подшипников качения, различного рода переходные посадки.

В этих соединениях должна обеспечиваться точность взаимного положения деталей в процессе их работы, а также выполнение ими определенных функциональных требований, например недопущение смещений деталей относительно друг друга, жидкостная и газовая герметичность и т.д.

К основным факторам, определяющим производственную технологичность рассматриваемых конструкций и их последующую работоспособность, относятся величины создаваемых натягов, их вероятностное распределение в партии изготавливаемых сборочных единиц, давления, действующие на контактных площадках соединяемых поверхностей. Влияние этих и ряда других факторов проявляется как в процессе сборки, так и при последующей эксплуатации рассматриваемых объектов.

Среди параметров, обеспечивающих работоспособность неподвижных соединений, важными являются физико-химические характеристики материалов соединяемых деталей и параметры внешнего силового, скоростного и температурного воздействия, наблюдающиеся в процессе эксплуатации рассматриваемой техники.

К существенным факторам относится и коэффициент трения, реализующийся на площадках фрикционного контакта сопрягаемых поверхностей. Его величина, в частности, определяет прочностные показатели неподвижного соединения. В то же время при оценке влияния коэффициента трения на работоспособность неподвижного соединения необходимо иметь в виду, что такие соединения представляют собой особый вид трибосопряжений, для которых характерны высокие удельные нагрузки, малые скорости и перемещения, в результате чего на фрикционном контакте реализуются весьма сложные процессы и явления.

Таким образом, можно полагать, что на микроплощадках контактирования сопрягаемых поверхностей в большинстве рассматриваемых случаев осуществляются взаимные микроперемещения, позволяющие считать рассматриваемые неподвижные разъемные соединения как условно подвижные, в результате чего может наблюдаться изнашивание контактирующих поверхностей.

Поэтому существенное влияние на закономерности и интенсивность протекания разрушающих явлений на условно-подвижных поверхностях оказывает наличие различного вида промежуточных слоев, самопроизвольно образующихся и специально создаваемых между функциональными поверхностями сопрягаемых деталей.

В качестве таких слоев могут использоваться тонкие металлические или полимерные покрытия, которые в существенной степени способствуют трансформации исходных параметров макрогеометрии и волнистости поверхностей, снижая погрешности формы и тем самым создавая более плотный контакт.

Кроме того, направленная и регламентируемая трансформация геометрии соединяемых поверхностей и реструктуризация разделяющих их слоев может обеспечивать частичную или полную замену внешнего трения на поверхностях деталей на внутреннее в формируемых промежуточных слоях. А это в свою очередь вполне может способствовать повышению эксплуатационного уровня работоспособности неподвижных соединений по многим функциональным параметрам [1].

Оптимизация совокупностей указанных выше факторов позволяет в существенной степени повысить износостойкость, контактную жесткость, способность формирования плотных стыков при сборке и за счет этого обеспечить существенное повышение срока надежной эксплуатации изделий.

Разноплановость требований к показателям работоспособности рассматриваемых соединений предопределяет задание различных требований

к благоприятному уровню сочетания функциональных характеристик поверхностей, составляющих стык неподвижного соединения, как для обеспечения эксплуатационных параметров узла, так и необходимых для оптимизации технологических процессов сборки узлов, содержащих условно-подвижные посадки деталей.

Следует иметь в виду, что наносимые слои должны обладать достаточной технологичностью, т.е. иметь высокие эксплуатационные показатели. Для этого структурное состояние материала покрытия должно обеспечивать возможность его реструктуризации и образования в результате этого благоприятного аморфного состояния материала, позволяющего получать слои различной толщины, нивелирующие погрешности сопрягаемых деталей.

Важнейшим фактором работоспособности является и достижение достаточно прочного сцепления граничных слоев материала трансформируемого покрытия с материалом поверхности детали, на которое оно наносится, при одновременном обеспечении аморфного состояния внутренних слоев покрытия, в которых в процессе эксплуатации должно реализоваться явление внутреннего трения.

Для достижения такого состояния в процессе последующей обработки наиболее перспективными представляются исходные покрытия, закрепляемые на металлической основе за счет действия сил адгезии. Из возможных способов нанесения такого рода покрытий наиболее доступным является использование химического и электрохимического осаждения.

При использовании для химического осаждения исходного покрытия меди могут быть получены слои толщиной от 2 до 10 мкм и более. Химическое осаждение является достаточно технологичным процессом, материалы для его выполнения недефицитны и относительно недороги. При его выполнении обеспечивается необходимая равномерность осаждения материала покрытия по всей функциональной поверхности, а само покрытие имеет мелкокристаллическое строение и обладает низкой пористостью, а также достаточно малой дефектностью получаемой структуры. Однако именно это затрудняет реструктуризацию покрытия и его аморфизацию для обеспечения высокой работоспособности получаемых герметизирующих соединений деталей гидросистем.

При нанесении электролитических покрытий меди возможно создание слоев толщиной от долей микрометра до десятых долей миллиметра. Они могут быть эффективно использованы как защитные, но сложно аморфизируемые пленки. Перспективным по эксплуатационным параметрам является и латунирование, которое существенно повышает антифрикционные свойства создаваемых функциональных поверхностей. Вместе с тем возможности реструктуризации этих покрытий также весьма ограничены.

Для достижения более эффективной работы неподвижных соединений целесообразно для нанесения трансформирующих покрытий исполь-

зование распыления (пульверизации) материала электродуговым или газопламенным способом или же нанесение исходного слоя в процессе выполнения финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО).

Механизм функционирования создаваемых промежуточных слоев сводится к следующему. Как газотермические, так и химические покрытия, наносимые на контактирующие поверхности в процессе их формирования, достаточно надежно закрепляются на них за счет действия адгезионных связей. Далее должна осуществляться технологическая аморфизация внутренней части создаваемого промежуточного слоя и распределение аморфизированного материала, нивелирующего погрешности контактирующих поверхностей.

Поэтому при приложении эксплуатационной нагрузки срыв покрытия с материала подложки не происходит, а все относительные микро- и макроперемещения реализуются во внутренних слоях покрытия.

Для создания такого покрытия нами была предложена технологическая схема [3], ориентированная на повышение работоспособности гидравлических соединений, герметичность которых достигается за счет обеспечения плотного прилегания конической или сферической поверхности ниппеля к рабочей поверхности штуцера. Необходимое для этого нагружение создается с помощью накидной гайки, которая осуществляет сжатие и должна образовывать замкнутую непроницаемую для рабочих сред полосу контакта.

Для решения этой задачи на охватываемую поверхность штуцера газотермическим способом наносится функциональный слой меди. Рекомендуемые режимы нанесения такого покрытия составляют: толщина покрытия 8–10 мкм; расстояние от сопла технологической установки до обрабатываемой поверхности 100 мм; температура струи 1050–1100°C и температура подложки 400°C. При этих режимах достигается достаточная прочность сцепления покрытия с подложкой и необходимая стабильность его структуры по различным показателям составляющих ее частиц наносимого материала.

Вторым возможным вариантом создания промежуточного слоя является финишная антифрикционная безабразивная обработка. При ее выполнении слой покрытия на штуцере создается методом натирания медесодержащего сплава, например латуни Л-62. Для интенсификации процесса натирания в зону взаимодействия образца и латунного прутка подавалась специальная активирующая среда. Ширина формируемой полосы последующего контактного взаимодействия составила 3–5 мм и определялась диаметром используемого прутка.

При реализации обоих вариантов на охватываемую поверхность ниппеля рекомендуется наносить методом химического осаждения слой меди толщиной 2–4 мкм. Покрытие создается путем помещения рабочей части ниппеля в специальную ванну, заполненную раствором следующего

состава (г/л): сернокислая медь – 10; серная кислота – 10. Этот раствор при температуре 15–25°C обеспечивает достижение скорости наращивания около 10 мкм/ч.

Схема нанесения газотермического покрытия представлена на рисунке.

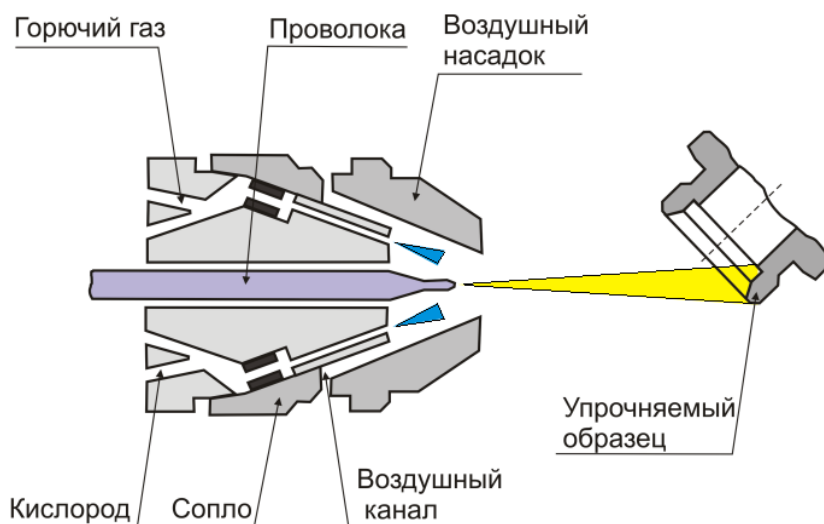


Схема нанесения газотермического покрытия

После нанесения указанных выше трансформируемых покрытий на функциональные поверхности деталей неподвижного разъёмного соединения осуществляется их совместная приработка с приложением осевой нагрузки 20–30 Н. Для достижения аморфизации промежуточного слоя приработка осуществляется в среде глицерина (90%) и уксусной ледяной кислоты (10%) при возвратно-вращательном движении на 3–5 оборотов в каждую сторону и осциллирующем угловом перемещении с частотой 10–12 Гц на угол 3–5°.

После выполнения совокупности предлагаемых операций создания промежуточного слоя достигаются следующие его функциональные параметры.

Покрyтия, наносимые на контактирующие поверхности деталей, достаточно прочно закрепляются на них за счет действия адгезионных связей. В результате при приложении смещающей нагрузки срыв покрyтия с материала подложки не происходит, а все относительные микро- и макроперемещения реализуются во внутренних промежуточных слоях. При этом благоприятные условия эксплуатации достигаются при обеспечении аморфного состояния материала промежуточного слоя.

В связи с тем, что промежуточный слой, сформированный в результате сочетания газотермического покрyтия охватывающей детали и химического покрyтия охватываемой детали и их совместной аморфизирующей приработки, является достаточно мягким и пластичным, представляется возможность его дополнительной обработки методами поверхностного

пластического воздействия, которые позволяют формировать благоприятный регулярный микрорельеф, имеющий разные высотные и шаговые показатели в продольном и поперечном направлениях.

Нанесение такой шероховатости позволяет минимизировать возможность образования в контактной зоне соединения сквозных капилляров, способствующих утечке рабочих жидкостей и разгерметизации стыка.

Целесообразность использования предложенных способов герметизации подтверждена результатами лабораторных и натурных исследований [2], которые показали, что подобным образом можно существенно повысить надежность неподвижных соединений строительных, дорожных и других технологических машин за счет увеличения герметичности и износостойкости.

Установлена также возможность использования указанной обработки для восстановления работоспособности деталей герметизирующих соединений вследствие износа или недопустимой поверхностной деформации.

Библиографический список

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
2. Памфилов, Е.А. Обеспечение герметичности разъемных соединений гидравлических систем технологических машин / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, С.В. Тяпин // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 1170-1172.
3. Патент RU № 2499171. Способ изготовления неподвижных разъемных соединений / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков, С.В. Тяпин; заявл. 25.11.2011; опубл. 20.11.2013. Бюл. № 32.

УДК 621.822

И.В. Горлов, А.Н. Болотов, В.В. Мешков, А.И. Горлов
Тверской государственной технической университет

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Описано лабораторное устройство для испытания материалов для тяжело нагруженных узлов трения, в частности, используемых в сопряжении тележки и кузова пассажирского вагона. Устройство имеет автоматизированную систему регистрации контролируемых параметров, что позволяет с высокой точностью определять основные характеристики трения в узле.

Ключевые слова: трение, износ, испытания, система регистрации параметров

DEVICE FOR TESTING MATERIALS FOR HEAVY LOADED FRICTION UNITS

The paper describes the laboratory device for tribotechnical materials testing for the heavy loaded frictional units, particularly for a conjugation of the truck and the body of the passenger carriage. The device has an automated registration system of the controlled parameters that provides high accuracy determination of the main friction characteristics in the unit.

Keywords: friction, wear, testing, parameters registration system.

Исследование триботехнических характеристик узлов трения позволяет выявить основные недостатки трибосопряжения на этапе проектирования, что, в свою очередь, позволяет оптимизировать детали узлов трения к условиям эксплуатации. Для этих целей широко используются специальные лабораторные устройства, моделирующие условия, близкие к реальным [1–3].

Практический интерес представляет проблема оценки фрикционных характеристик материалов в трибоузле вкладыш скользяна – скользян опоры кузова пассажирского вагона. Условия трения в узле: движение возвратно-вращательное с небольшой амплитудой (до 100 мм) и малыми скоростями (до 0,01 м/с) при давлении 3,3–3,8 МПа.

В настоящее время для триботехнических испытаний используются различные схемы трения. Наиболее близкая к реальным условиям эксплуатации является схема узла трения, в которой пальчиковые образцы скользят по плоской поверхности контртела. В пальчиковых машинах трения применяются различные виды движения: вращательное одностороннее, обратно поступательное, обратно вращательное и другие. Для испытаний используются устройства, реализующие возвратно-вращательное движение с помощью кривошипно-шатунного механизма, приводимого в движение от асинхронного электродвигателя с червячным редуктором. Асинхронный электродвигатель обеспечивает достаточно устойчивую скорость вращения при изменяющейся нагрузке, а червячный редуктор позволяет получить требуемое передаточное отношение за счет относительно несложного устройства.

Скорость движения в этом случае наиболее рационально менять за счет изменения расстояния от оси вращения выходного вала редуктора до точки крепления шатуна (при изготовлении кривошипа необходимо предусмотреть выполнение нескольких отверстий для крепления оси шатуна на различном расстоянии от оси вращения).

Принципиальная схема устройства. В качестве контртела использовался диск из стали 40Х, рабочая поверхность которого имеет шероховатость Ra 0,16–0,32 и твердость $HRC50$, что соответствует параметрам реального узла.

На первой стадии проектирования была создана компьютерная модель устройства для испытания материалов (рис. 1). Контртело 1 было установлено в подшипниках качения и закреплено на кронштейне 2 к неподвижному основанию 3. В устройстве пальчиковые образцы устанавливались с двух сторон от контртела, компенсируя осевое усилие друг друга.

Нагрузка на образцы задавалась через рычаги 4 и полиспастный механизм 5 с помощью груза (на рис. 1 не показан). При износе пальчиковых образцов груз на тросе будет опускаться вниз, не изменяя силы нагружения, что обеспечит стабильные результаты измерений.

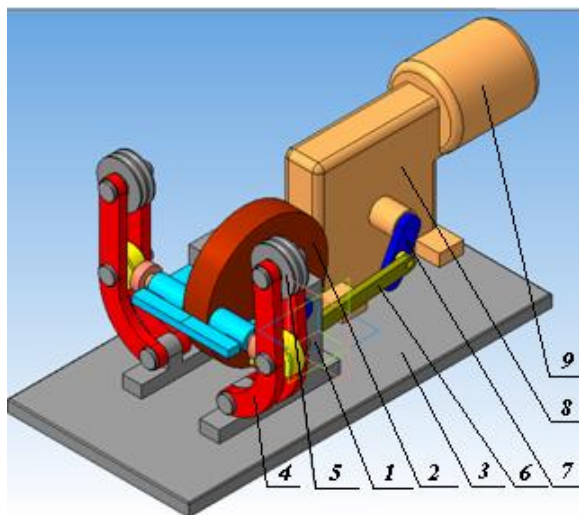


Рис. 1. Модель устройства для испытания материалов

Привод движения контртела осуществляется шатуном 6, соединенным с кривошипом 7. Кривошип установлен на выходном валу червячного редуктора 8, который приводился в движение электродвигателем 9. Для измерения момента трения использовались стандартные полупроводниковые тензобалки, содержащие два тензодатчика, соединенных по мостовой схеме. Тензодатчики помещены в нагруженной и ненагруженной частях балки, а измеряемый потенциал зависит от изменения относительного сопротивления датчиков. В качестве основного измерительного элемента использовалась тензобалка *LPS-30* (рис. 2) со следующими характеристиками: рабочий коэффициент передачи 2мВ/В, входное/выходное сопротивление 410/350 Ом, погрешность измерения 0,02% в интервале температур от +30 до -30°C.



Рис. 2. Тензобалка *LPS-30*

Балка имеет сертификаты соответствия *OIML C3*, *NTEP III 5000 S*. Кроме того, конструкция балки имеет высокую жесткость и даже при изменении точки приложения силы на 20 мм не возникают дополнительные погрешности, а величина максимального вертикального смещения не превышает 0,1 мм.

Для регистрации, полученной при измерении силы трения, был разработан специальный аналого-цифровой преобразователь. Данный блок предназначен для преобразования аналогового сигнала, получаемого с измерительного моста тензодатчиков, в цифровой код, передаваемый персональному компьютеру (ПК) для обработки в специальном приложении.

Блок позволяет преобразовывать входной дифференциальный сигнал с трех каналов непрерывно или выборочно. Так как в большинстве стандартных промышленных тензоизмерителей используется схема соединения тензодатчиков в измерительный мост, это позволяет применить данный блок для широкого спектра тензоизмерителей.

Обмен данными блока с ПК осуществляется через коммуникационный порт *RS-232*, что повышает надежность передачи данных без потери целостности информации. Степень защиты блока *IP40*, класс электробезопасности – I.

Периферия блока содержит разъемы для питания, коммуникационного порта, аналогового входа (три канала), питания вторичных управляемых цепей (220 В, 3 А) и световую индикацию состояния (2 красных, желтый и зеленый светодиода). Световая индикация состояния:

красный 1 светится – электропитание в норме;
красный 2 светится – обнаружены ошибки в работе устройства;
желтый светится – буфер обмена переполнен (возможно, соединение потеряно);

зеленый светится – нормальный рабочий режим.

Габаритные размеры: ширина 110 мм, длина 165 мм, высота 45 мм.

Корпус блока выполнен из листовой стали, на боковых сторонах корпуса расположены разъемы и светоиндикация.

Устройство и принцип работы блока регистрации. Модуль питания построен на основе импульсного преобразователя напряжения, обеспечивающего питание контроллера с АЦП и коммутацию вторичной управляемой цепи. Напряжение вторичного питания блока 9 В.

Модуль контроллера с АЦП построен на основе микроконтроллера (МК) *AT89C52-24AI*, ядро которого работает на частоте 24 МГц, и 16 бит АЦП *AD7798*, управляемого микроконтроллером. В состав модуля входят прецизионный стабилизатор напряжения (5 В), узел управления и защиты вторичной управляемой цепи, светодиоды индикации состояния и устройство согласования уровней *CMOS – RS-232*. Конструктивно модуль состоит из двух электронных схем, соединенных между собой разъемом *IDE-40*. Такое конструктивное исполнение требуется для возможности прошивки и отладки МК вне блока, так как у *AT89C52-24AI* нет встроенного *ISP* (внутрисхемного программирования).

Основой блока является АЦП микросхема *AD7798*, имеющая три мультиплексируемых канала захвата аналогового сигнала с возможностью буферного конвертирования. Разрядность АЦП составляет 16 бит, что позволяет кодировать аналоговый сигнал с высокой точностью. Конвертирование данных осуществляется по принципу Σ - Δ модуляции, позволяющей повысить помехоустойчивость измерений. Микросхема содержит встроенную систему подавления фона 50/60 Гц, индуктивно или кондуктивно наводимого в линиях связи измеряемого сигнала, что позволяет использовать блок совместно с силовыми промышленными установками.

Последовательность работы узлов блока: включение питания блока; нормализация напряжения питания внутренних узлов; аппаратный рестарт микроконтроллера; настройка и проверка узлов блока микроконтроллером; ожидание готовности работы АЦП; тестирование опорного напряжения АЦП; первоначальная настройка параметров захвата и кодирования сигнала; отображение световой индикацией состояния блока после тестирования; ожидание установка связи с ПК; в случае установки связи – выполне-

ние команд от ПК и отправка конвертированных данных с АЦП к ПК; контроль состояния устройства вторичного управления.

Особенность конструкции блока позволяет подключать к нему почти любые тензоизмерительные устройства с разной чувствительностью и точностью. Особенностью измерения будут лишь изменения схемы подачи аналогового сигнала на вход блока, а также ограничение амплитуды и частоты получаемого сигнала до допустимого предела.

Наличие выходного разъема для управления вторичными силовыми цепями позволяет автоматизировать процесс измерения, возможностью управления силовыми агрегатами исследовательского устройства, что повышает точность измерения.

Блок позволяет также изменять алгоритм работы узлов измерения, путем «перепрошивки» встроенного программного обеспечения измерительного блока. Это дает возможность расширения применимости блока для измерения и управления измерительными установками широкого спектра.

Конструкция устройства и методика проведения испытания. После анализа модели устройства была проведена детальная проработка и изготовлено устройство для испытания антифрикционных материалов (рис. 3).

Устройство представляет собой основание 7 с контртелом 6 в виде кольца, по которому трется пальчиковый образец, установленные на тензобалку 16 (схема трения плоскость – торец пальчика, движение возвратно-вращательное). Привод контртела осуществляется через кривошипно-шатунный механизм от электродвигателя 9 с редуктором 8. Нагрузка на образцы задается нажимными рычагами 2 от полиспастного механизма 5 грузом (на рисунке не показан). С помощью тензобалки измеряется сила трения между контртелом и образцом, по ней рассчитывается коэффициент трения для испытываемого материала. Величина износа образцов определяется по изменению расстояния между нажимными подшипниками 4.

Перед началом испытаний образцы 2 устанавливаются в направляющую оправку 1 и затем в отверстия суппорта 3, предварительно смазанные консистентной смазкой (рис. 4). Подводятся нажимные рычаги до упора подшипниками в торцы направляющих втулок образцов, протягивается через ручки шкивов трос 4 и подвешивается на него груз установленного веса.

Подсоединяется разъем 1 проводов от тензобалки к разъему аналого-цифрового блока 2, а также к разъему компьютера 3, включается блок питания 4 аналого-цифрового блока, запускается управляющая программа на компьютере (рис. 5).

До момента запуска установки проводится калибровка измерительной системы нажатием с помощью мышки на кнопку 1 «Калибровка», отображенной в диалоговом окне программы (рис. 6).

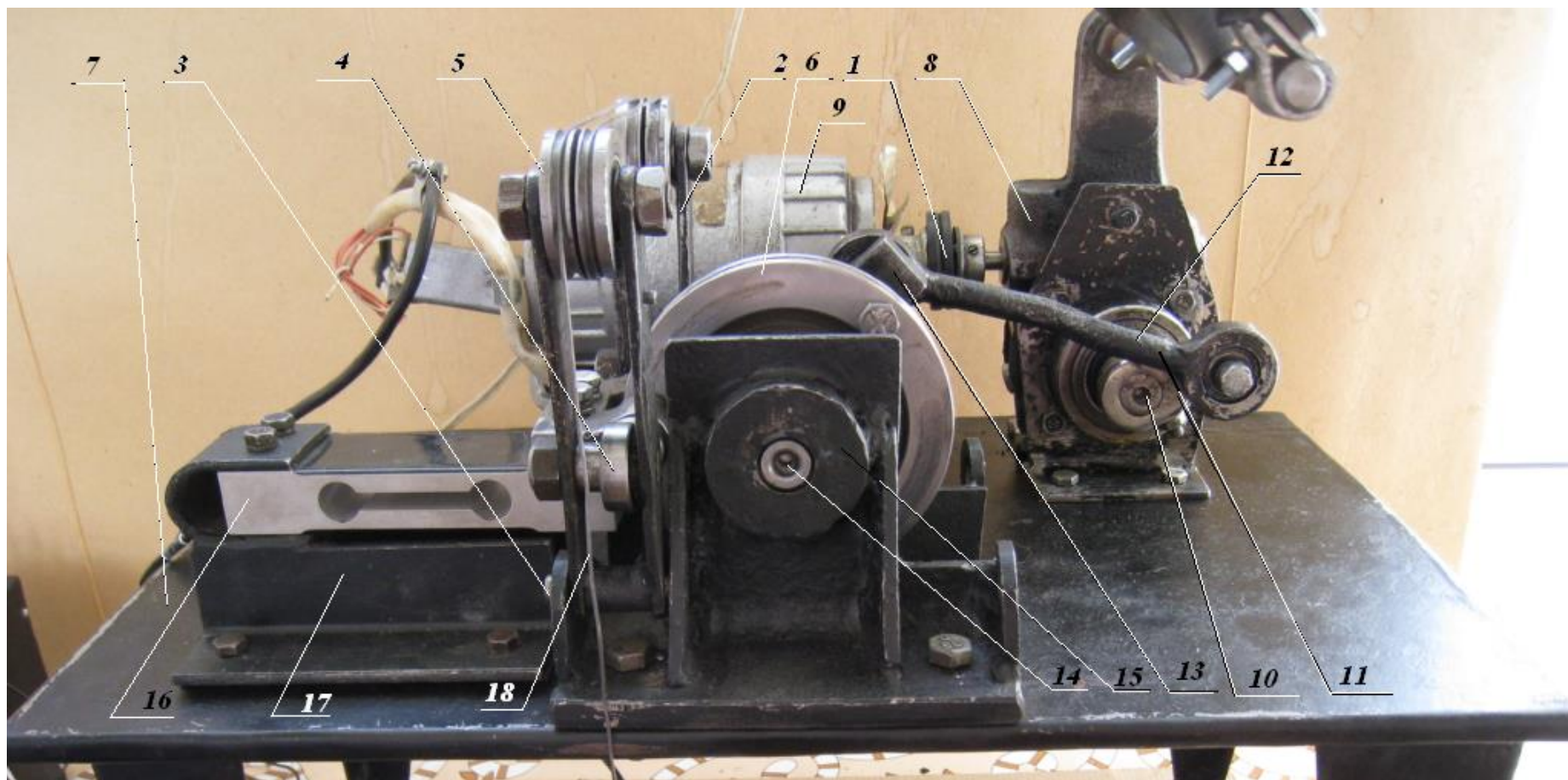


Рис. 3. Общий вид установки для испытания антифрикционных материалов: 1 – муфта; 2 – нажимной рычаг; 3 – ось; 4 – нажимной подшипник; 5 – полиспастный механизм; 6 – контртело; 7 – основание; 8 – редуктор; 9 – электродвигатель; 10 – выходной вал редуктора; 11 – кривошип; 12 – шатун; 13 – рычаг; 14 – вал привода; 15 – кронштейн; 16 – тензобалка; 17 – основание тензобалки; 18 – трос

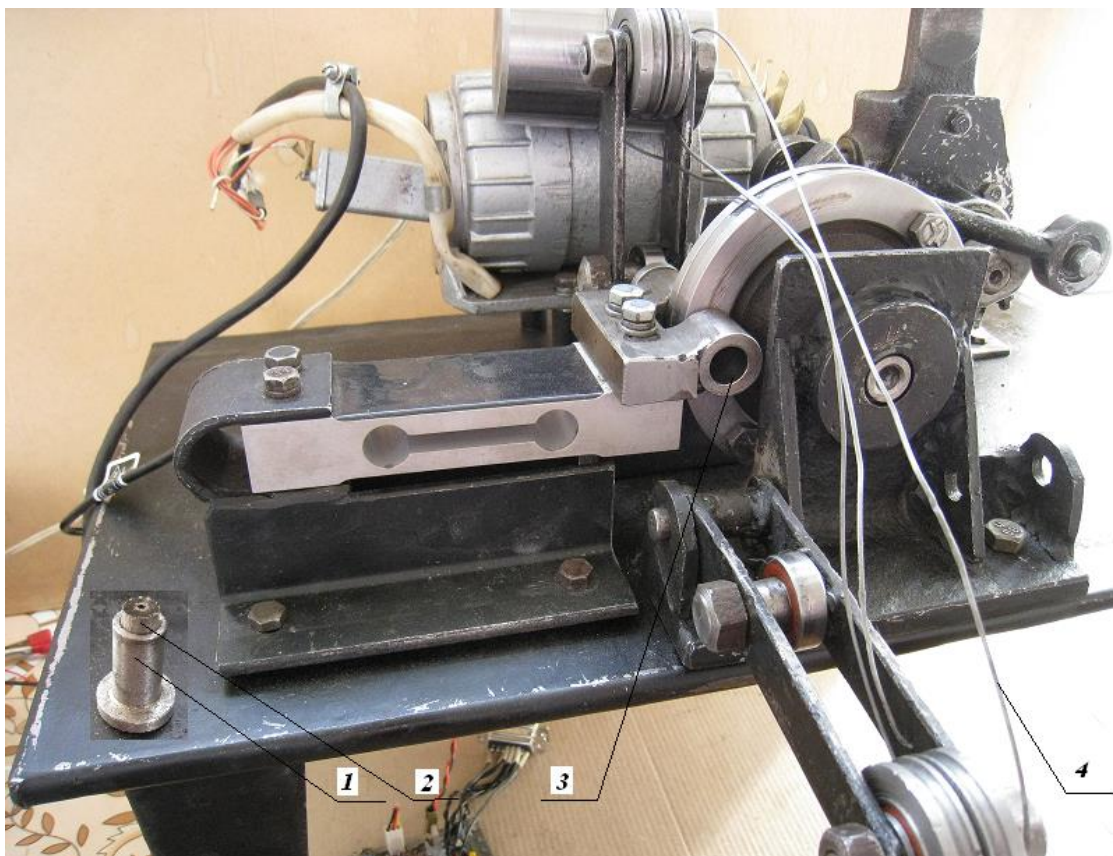


Рис. 4. Схема установки образцов для испытаний

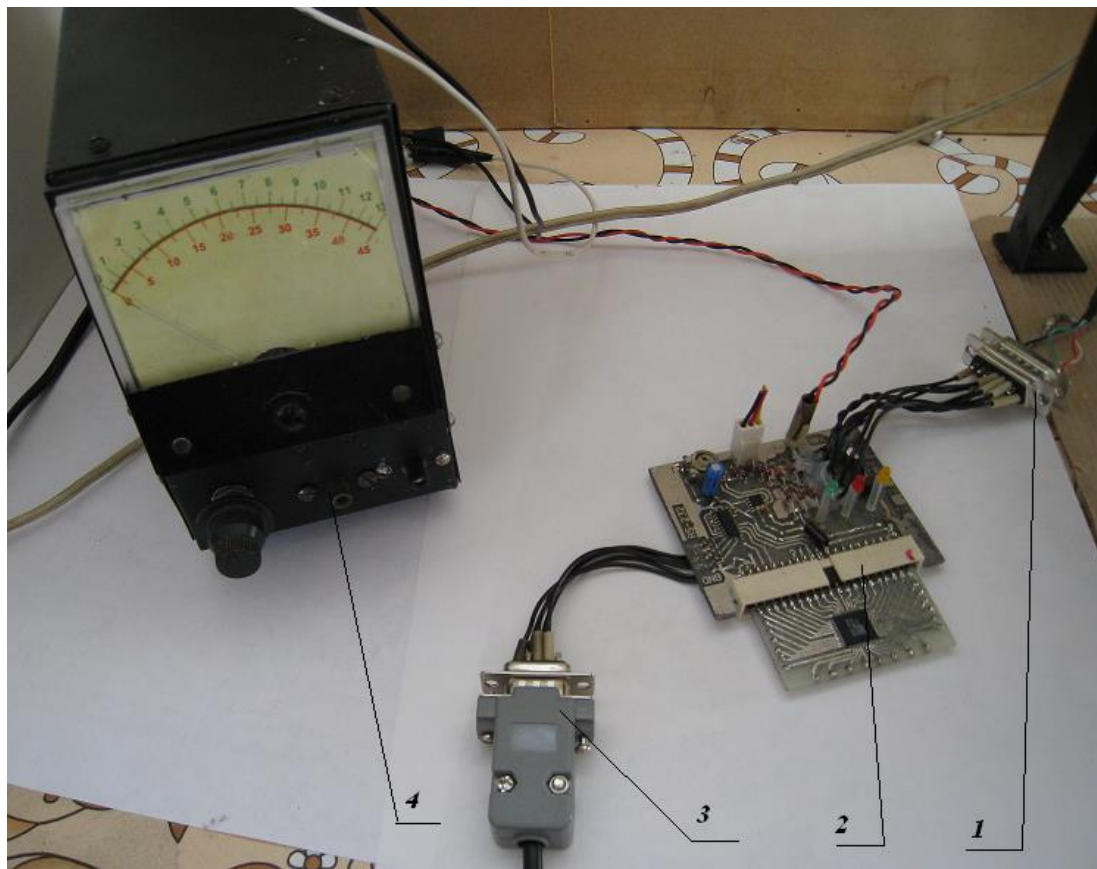


Рис. 5. Схема подключения измерительного устройства

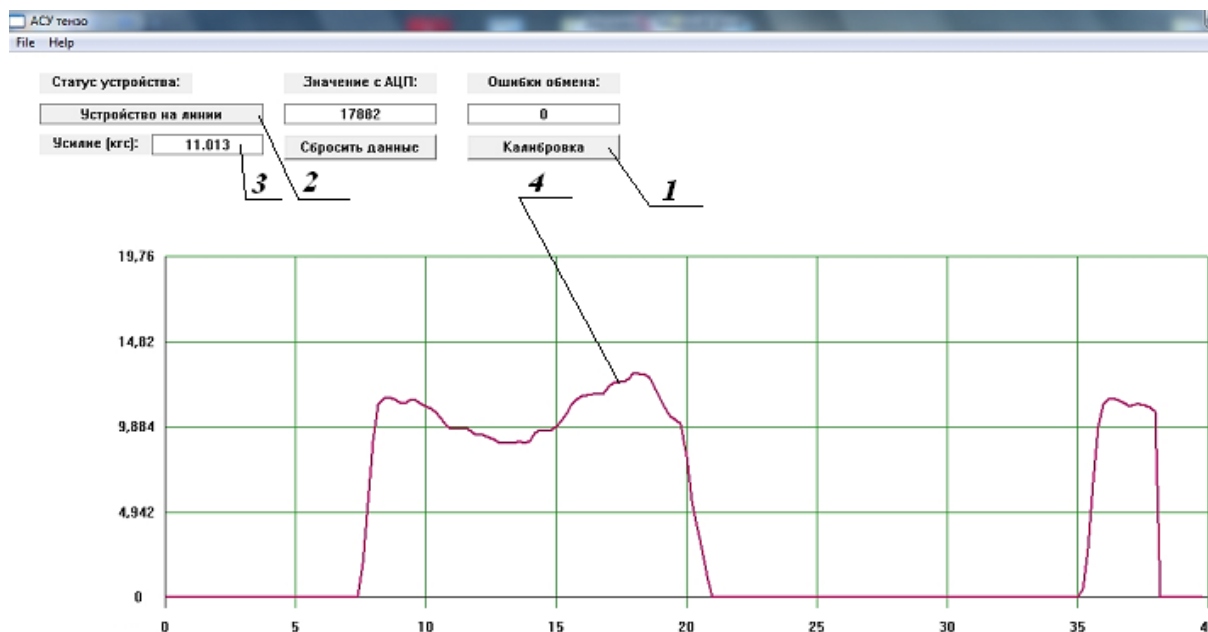


Рис. 6. Диалоговое окно программы управления измерениями

При коммутации датчика с блоком и компьютером в левой верхней ячейке 2 окна высвечивается надпись «Устройство на линии». Если надписи нет, то необходимо проверить наличие питания и коммутацию элементов измерительной системы.

Для притирки образцов привод устройства включается на 5–7 мин.

После остановки привода измеряется расстояние снаружи нажимных подшипников с помощью микрометра с пределами измерений от 125 до 150 мм, и результат записывается в бланк отчета. Измерения проводятся всегда в одном и том же положении двух кольцевых контртел относительно пальчиковых образцов после полного остывания узла трения до температуры 20–25°C.

Для проведения испытаний включается привод устройства, проверяются показания измерительной системы и устройства записи. Текущее значение усилия на тензобалку отображается в ячейке 3 диалогового окна программы и изображается в виде функции 4 в координатах время – усилие (см. рис. 6). Значения усилия, полученные в процессе измерений, сохраняются в памяти в виде массива чисел и в виде графиков изменения усилия на тензобалке за половину цикла движения.

По записанным данным от измерительной системы определяются:

- максимальный коэффициент трения, полученный за время испытаний;
- минимальный коэффициент трения;
- среднее значение коэффициента трения;
- динамика изменения коэффициента трения в течение одного цикла поворота кольцевых инденторов;
- динамика изменения коэффициента трения в течение всего испытания.

Разработанное устройство для испытания позволяет за относительно небольшой промежуток времени провести сравнительные исследования триботехнических материалов в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, и выбрать материалы с наиболее оптимальными характеристиками.

Кроме того, автоматизированная система регистрации и обработки информации позволяет осуществлять контроль и сохранение в автоматическом режиме, что повышает точность измерений и снижает вероятность субъективных ошибок при испытании. Гибкая система управления процессом измерения позволяет реализовать широкий спектр возможностей при проведении испытаний материалов с различными свойствами.

Библиографический список

1. Болотов, А.Н. Сравнительные триботехнические испытания материалов / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика фрикционного контакта: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2003. Вып. 10. С. 40-44.
2. Борисов, М.В. Ускоренные испытания машин на износостойкость как основа повышения качества / М.В. Борисов, И.Ф. Павлов, В.И. Постников. М.: Издательство стандартов, 1976. 351 с.
3. Евдокимов, Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. М.: Наука, 1980. 228 с.

УДК 621.822

И.В. Горлов, А.Н. Болотов, В.В. Мешков, Д.И. Горлов
Тверской государственной технической университет

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Представлены результаты испытания материалов для тяжело нагруженного узла трения: вкладыш скользуна – опора тележки и кузова пассажирского вагона.

Ключевые слова: трение, износ, антифрикционные материалы.

TESTING MATERIALS FOR HEAVY LOADED FRICTION UNITS

The results of materials tests for a heavy loaded friction unit: slide block – the truck and the body of the passenger carriage, are presented.

Keywords: friction, wear, antifrictional materials.

Ресурс узлов трения в большой мере зависит от качества материалов, которые должны быть адаптированы к конкретным условиям эксплуатации [1–3]. Пассажирские вагоны эксплуатируются в условиях больших перепадов температур при повышенной влажности и запыленности. Агрессивная окружающая среда накладывает специфические требования на материалы,

используемые в вагонах. В таких условиях работает ряд узлов трения вагонов, в том числе опора тележки и кузова пассажирского вагона.

В данной работе представлены результаты испытания материалов трибоузла – вкладыш скользуна и опора кузова пассажирского вагона.

Испытания проводились на устройстве [4], реализующем пальчиковую схему трения, с автоматизированной системой регистрации силы трения. Условия трения: движение возвратно-вращательное с амплитудой до 100 мм и малыми скоростями (до 0,01 м/с), давление 3,3–3,8 МПа.

Материалом контртела выбрана сталь 40Х с шероховатостью Ra 0,16–0,32 и твердостью $HRC50$, что соответствует параметрам реального узла.

В качестве материалов для испытаний выбраны бронза БрО-10Ц2, самосмазывающиеся материалы: углепластик на основе фенолформальдегидной смолы ОПМ-94, фторопласт Ф-4 и полиамид ПА6.

На рис. 1 показано изменение силы трения бронзы БрО-10Ц2 с использованием консистентной смазки за один цикл движения. Видно, что максимальная величина силы трения наблюдается в момент начала движения контртела и в конце цикла при остановке, когда скорость скольжения близка к нулю. Максимальный коэффициент трения за цикл 0,13, минимальный, полученный при максимальной скорости скольжения (0,01 м/с), – 0,09, т.е. с ростом скорости скольжения коэффициент трения снижается. Интенсивность линейного износа образцов для принятых условий испытаний составляет $7,48 \times 10^{-9}$.

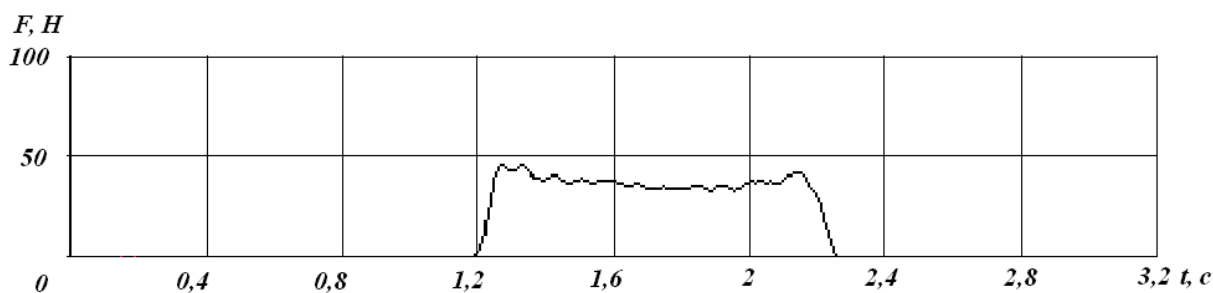


Рис. 1. Изменение силы трения F за один цикл движения при испытаниях на бронзе БрО-10Ц2 с использованием консистентной смазки

В условиях недостаточного смазывания по мере расходования смазки коэффициент трения постепенно увеличивался, и при ее полном израсходовании максимальное значение коэффициента трения достигло 0,23 (минимальное значение за цикл 0,2). Интенсивность линейного износа при дефиците смазки составила $1,22 \times 10^{-8}$. Следовательно, в случае несвоевременного смазывания узла интенсивность износа возрастает в 1,63 раза, что недопустимо.

В начальный момент испытаний коэффициент трения углепластика ОПМ-94 составлял 0,22, в процессе испытаний он увеличился до 0,31. Ин-

тенсивность линейного износа этого материала за 23100 циклов движения, что соответствует пути 1848 м, составила $4,3 \times 10^{-8}$. Увеличение коэффициента трения углепластика ОПМ-94 объясняется изменением состояния поверхности контртела за счет образования пленки переноса из углепластика (частицы смолы и графита) и снижения шероховатости поверхности.

Среднее значение коэффициента трения фторопласта Ф-4 составило 0,17 и в пределах одного цикла изменялось от 0,16 до 0,18. По результатам испытаний интенсивность линейного износа для принятых условий исследования составила $2,35 \times 10^{-6}$. Причиной быстрого износа образцов из фторопласта является его текучесть в условиях высокого контактного давления.

В процессе исследований графитонаполненного полиамида ПА6 коэффициент трения был достаточно стабилен и вырос за время испытания с 0,14 до 0,16. В начале испытаний за один цикл движения коэффициент трения изменялся от 0,13 до 0,14 (рис. 2).

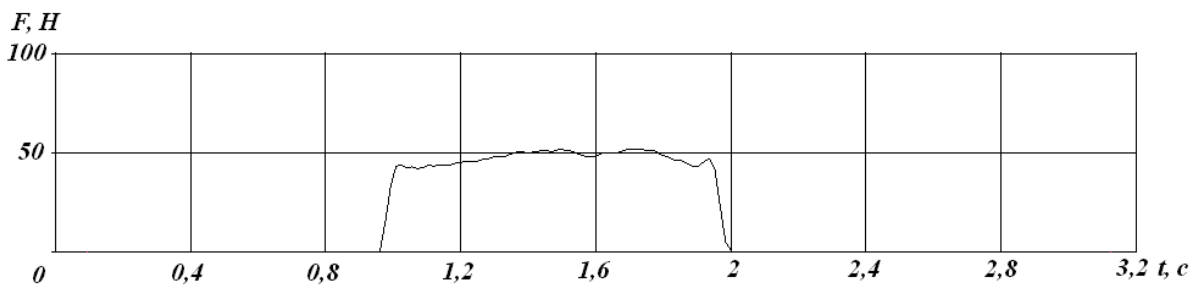


Рис. 2. Изменение силы трения F за один цикл при испытаниях графитонаполненного полиамида ПА6

В конце испытаний коэффициент трения графитонаполненного полиамида ПА6 в течение одного цикла изменялся от 0,14 до 0,16. Причем в момент начала и конца движения, при скоростях близких к нулю, не наблюдался существенный рост силы трения, т.е. уровень фрикционных потерь в режиме старт-стоп невелик и может положительно сказаться на плавности хода в узле трения. Интенсивность линейного износа образцов составила $4,05 \times 10^{-8}$.

В начале испытаний маслonaполненного (при полимеризации) полиамида ПА6 максимальный коэффициент трения в течение одного цикла движения составил 0,16, минимальный – 0,13. С увеличением числа циклов максимальный коэффициент трения постепенно увеличился до 0,2, причем в пределах одного цикла стал неравномерным (минимальное значение коэффициента трения 0,15, максимальное 0,2).

Коэффициент трения маслonaсыщенного полиамида ПА6 (нефтяными пропитками, создающими на рабочей поверхности гидрофобный слой) был достаточно стабилен и за время испытаний вырос незначительно. В начале испытаний в течение одного цикла движения коэффициент трения образцов изменялся от 0,12 до 0,14 (рис. 3).

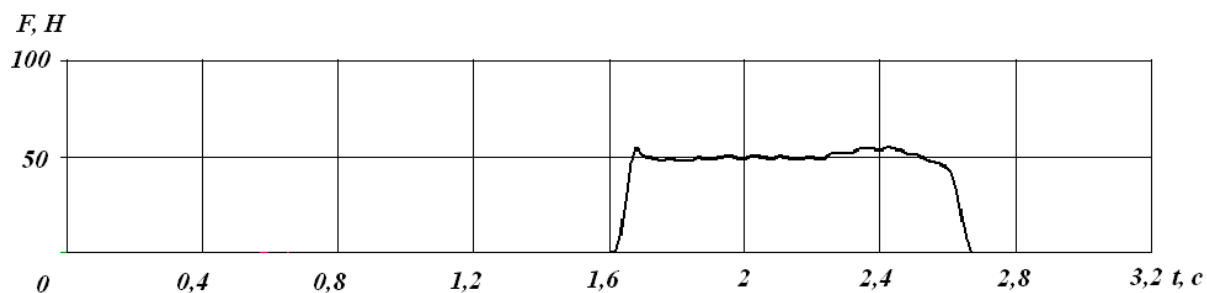


Рис. 3. Изменение силы трения F в течение одного цикла движения в начале испытаний маслонасыщенного полиамида ПА6

Интенсивность линейного износа образцов из маслонасыщенного полиамида ПА6 составила $3,45 \times 10^{-8}$.

Анализ результатов испытаний показал, что лучшей совокупностью фрикционно-износных характеристик в данных условиях обладает маслонасыщенный полиамид ПА6 (табл.).

Сводные триботехнические свойства антифрикционных материалов

Материал	Коэффициент трения при 20°C	Интенсивность износа $J_h \times 10^{-8}$
БрО-10Ц2 со смазкой Солидол С	0,13–0,23	0,75
Углепластик ОПМ-94	0,22–0,26	4,3
Ф-4	0,16–0,18	235
Графитонаполненный полиамид ПА6	0,14–0,16	4,05
Маслонаполненный полиамид ПА6	0,14–0,2	7,25
Маслонасыщенный полиамид ПА6	0,12–0,16	3,45

Библиографический список

1. Болотов, А.Н. Сравнительные триботехнические испытания материалов / А.Н. Болотов, И.В. Горлов // Механика и физика фрикционного контакта: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2003. Вып. 10. С. 40-44.
2. Муляр, Ю.Н. Антифрикционные смазывающие материалы в машиностроении / Ю.Н. Муляр // Машиностроительное производство. Серия «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении». М.: ВНИИТЭМР, 1991. Вып. 3. 64 с.
3. Ходус, В.В. Изготовление и эксплуатационные свойства деталей из триботехнических композиционных материалов / В.В. Ходус, А.С. Васильев // Машиностроительное производство. Серия «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении». М.: ВНИИТЭМР, 1991. Вып. 1. 47 с.
4. Горлов, И.В. Устройство для испытания материалов для тяжело нагруженных узлов трения / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, В.В. Мешков, А.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2014. Вып. 7. С. 73-81.

УДК 621.891

А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, Д.И. Горлов
Тверской государственной технической университет

КОМПЛЕКТ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАГНИТНЫХ СРЕД. Часть 2

В данной работе продолжено описание оборудования и методик исследования магнитных и триботехнических свойств нанодисперсных магнитных сред, в частности магнитных жидкостей с антифрикционными добавками.

Ключевые слова: нанодисперсные магнитные среды, магнитные жидкости, кривые намагничивания магнитных жидкостей, трение магнитной жидкости.

EQUIPMENT SET FOR STUDY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF NANODISPERSE MAGNETIC MEDIA. Part 2

This paper continues the description of the equipment and methods for the study of magnetic and tribological properties of nanodisperse magnetic media, in particular magnetic fluids with anti-friction additives.

Keywords: nanodisperse magnetic media, magnetic fluids, the magnetization curves of magnetic fluids, magnetic fluid friction.

Благодаря своим необычным физико-химическим свойствам магнитные жидкости (МЖ) нашли широкое применение в различных технических устройствах: узлах трения, уплотнениях, демпферах и т.д. [1, 2]. Однако технико-экономическая эффективность от использования МЖ в промышленности недостаточно высока [2]. Это обусловлено, в частности, отсутствием достоверных и надежных методов определения физических, химических и триботехнических свойств магнитных жидкостей с различного рода нанонаполнителями. В работе [3] приведено описание конструкций оборудования и методики исследования реологических, коррозионных свойств, а также коллоидной стабильности нанодисперсных магнитных сред, в частности магнитных жидкостей с антифрикционными добавками. В настоящей статье продолжено дальнейшее описание конструкций оборудования и методик для исследования магнитных и триботехнических характеристик МЖ.

В работе [3] показано что, не смотря на кажущуюся высокую эффективность работы МЖ в узлах трения, обусловленную очевидной возможностью удержания жидкостей около и в зоне фрикционного контакта, смазочные свойства МЖ значительно ниже, чем у аналогичных по назначению масел. Смазочные свойства магнитных жидкостей можно значительно улучшить наложением магнитного поля. В связи с этим возможность применения быстрого и достоверного метода построения кривой намагничивания и перемагничивания конкретной испытуемой магнитной жидкости

при использовании различных модифицирующих нанонаполнителей и дальнейшая оценка ее триботехнических свойств в зависимости от внешнего магнитного поля имеет большое значение при целенаправленном создании МЖ с заданными антифрикционными свойствами.

Прибор для определения кривых намагничивания и перемагничивания магнитных жидкостей. Кривые намагничивания и перемагничивания широко используются для изучения магнитных свойств веществ [4]. Применительно к магнитным жидкостям изучение этих кривых позволяет определять фазовый состав жидкостей, оценивать эффективные размеры дисперсных частиц, судить о коллоидной стабильности жидкостей в магнитных и температурных полях [5].

Магнитометр, применяемый в настоящее время для изучения магнитных свойств МЖ, имеет ряд недостатков. В частности, это небольшая величина намагничивающего поля в соленоиде и невысокая точность измерения магнитных характеристик вещества, обусловленная тем, что измерения проводятся в разомкнутой магнитной цепи. Кроме того, требуемые значения магнитных характеристик вещества получаются не сразу, а путем пересчета с учетом поправки на собственное размагничивающее поле, что при построении кривых намагничивания тела значительно увеличивает время исследований.

В настоящее время для изучения магнитных свойств твердых тел все шире используются магнитометры с датчиками Холла. Применительно к определению свойств магнитных жидкостей магнитометрический метод с холловскими преобразователями индукции не использовался. Однако при усовершенствовании его с учетом особенностей физико-механических свойств жидкостей этот метод может наиболее полно удовлетворить всему комплексу требований, предъявляемых к исследованию магнитных свойств магнитных жидкостей. Поэтому именно магнитометрический метод и был положен в основу разработанного прибора.

Прибор (рис. 1) состоит из электромагнита 7 с полюсными наконечниками, создающими в рабочем зазоре однородное магнитное поле. Кювета 4, имеющая форму прямоугольного параллелепипеда, с тщательно перемешанным до получения однородной магнитной структуры исследуемым веществом объемом приблизительно 1 см^2 устанавливается в рабочем зазоре электромагнита. Боковые стенки 5 кюветы выполнены из ферромагнитного материала. Прокладка 6 из эластичного материала обеспечивает плотное прилегание указанных стенок к полюсам электромагнита.

Индукция магнитного поля в исследуемом веществе измеряется датчиком Холла 1, установленным на внутренней поверхности одной из боковых стенок 5 кюветы. Такое расположение датчика позволяет максимальным образом избежать влияния граничных эффектов.

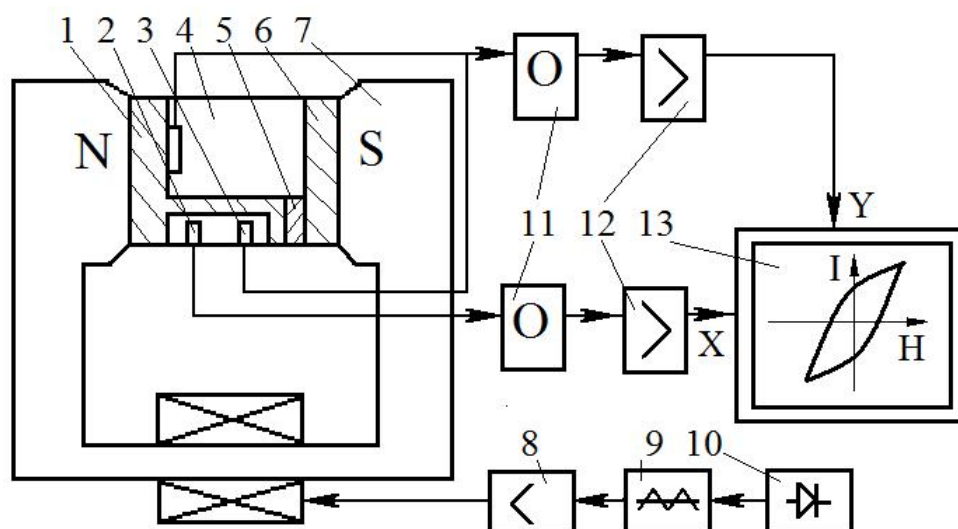


Рис. 1. Схема магнитометра

Напряженность намагничивающего поля катушки электромагнита измеряется датчиком Холла 2, установленным под дном кюветы параллельно датчику 1. Аналогичным образом установлен датчик 3, включенный встречным образом с датчиком 1, что позволяет выделить небольшой по величине сигнал, пропорциональный намагниченности исследуемого вещества.

Электромагнит подключен к источнику постоянного тока 10. Для полного размагничивания сердечника электромагнита и исследуемого вещества, а также для автоматической регистрации кривых перемагничивания постоянное напряжение преобразуется в переменное напряжение сигнала треугольной формы с помощью генератора 9. Амплитуда изменяется с помощью усилителя 8.

Для создания продольного тока через датчики Холла они подключены к стабилизированным источникам постоянного тока. Токи через датчики Холла 1 и 3 подбираются с одинаковой чувствительностью.

В измерительной цепи от общего напряжения, снимаемого с датчиков Холла, вычитается напряжение, которое не зависит от величины магнитного поля 11. Далее полезный сигнал с датчиков усиливается 12 и подается на измерительный прибор, например самописец 13. Коэффициент усиления подбирается так, чтобы снимать показания с прибора непосредственно в абсолютных величинах.

Компактность измерительного узла (размеры порядка $20 \times 20 \times 15$ см) позволяет с помощью термостата проводить температурные исследования процессов намагничивания. Ошибка в измерении напряженности намагничивающего поля не превышает 2%, намагниченности – 3%.

Прибор для изучения внешнего трения магнитной жидкости.

Прибор (рис. 2) состоит из электромагнита 1, между полюсными наконечниками 2 которого размещена магнитная жидкость 3. Узел трения в виде плоского образца 4 расположен в межполюсном зазоре. Прибор

снабжен специальным устройством для сообщения поступательного перемещения образцу, которое установлено над межполюсным зазором и состоит из подвижной платформы 5 с тензобалкой 6 и микрометрического винта 7. Движение микрометрическому винту задается от электродвигателя 8 и передается им платформе 5.

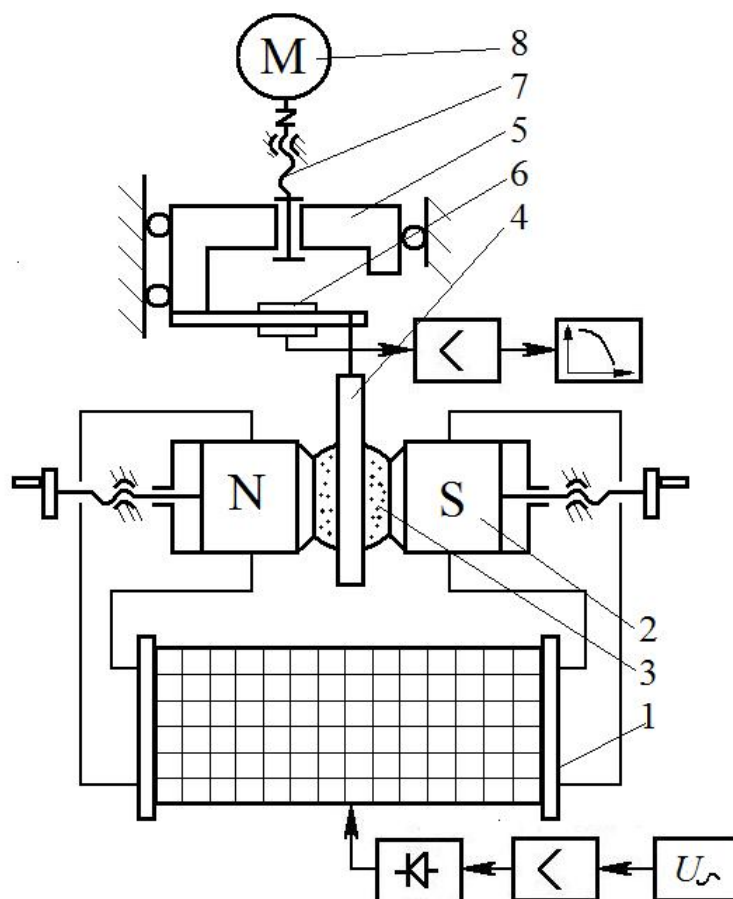


Рис. 2. Схема прибора для изучения внешнего трения

Полюсные наконечники электромагнита имеют размеры в сечении 40×10 мм. Образцы изготавливаются толщиной 1 мм и шириной 2 см (длина образцов не лимитирована). Образцы изготавливаются из материалов, слабо взаимодействующих с магнитным полем. Зазор между полюсами и образцом составляет около 1 мм и заполняется магнитной жидкостью фиксированного объема – 3 см^3 .

Электромагнит подключался к регулируемому источнику постоянного тока, что позволяло изменять индукцию магнитного поля от нуля до 2 Тл.

Механизм работы прибора заключается в следующем. При включении электродвигателя платформа 5 перемещается в вертикальном направлении, сообщая поступательное движение образцу, подвешенному на конце тензобалки, с весьма малой скоростью, равной $1,5 \cdot 10^{-2}$ мм/с. Сила внешнего трения, возникающая при этом между поверхностью образца и маг-

нитной жидкостью, регистрируется с помощью тензобалки, укрепленной на платформе 6, сигнал с которой через усилитель поступает на самописец.

При проведении непрерывного длительного эксперимента на полюсные наконечники электромагнита наклеиваются постоянные магниты одинакового с ними сечения, создающие поле с максимальной индукцией 0,31 Тл. Это позволяет выключать электромагнит на непродолжительное время. Причем, как показали специальные опыты, динамика нарастания прочности структуры МЖ с достаточной точностью определяется временем, когда поле создается электромагнитом, так как его номинальная величина в экспериментах составляла 1,1 Тл, что значительно выше поля магнитов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-08-00159-а).

Библиографический список

1. Болотов, А.Н. Магнитное масло для узлов трения, работающих при граничной смазке / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 9. С. 38-41.
2. Болотов, А.Н. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова. Тверь: ТвГТУ, 2013. 123 с.
3. Болотов, А.Н. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1 / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, М.В. Мардян // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2013. Вып. 6. С. 68-74.
4. Мишин, Д.Д. Магнитные материалы / Д.Д. Мишин. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.
5. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие / В.Е. Фертман. Мн.: Вышш. шк., 1988. 184 с.

УДК 621.91

М.Ш. Мигранов
Уфимский государственный авиационный технический университет,
А.М. Мигранов
Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НОВЫХ МАРОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований характеристик новых марок технологических смазочных материалов для лезвийной обработки резанием.

Ключевые слова: резание металлов, технологическая среда, трибологические свойства.

STUDY OF OPERATIONAL PROPERTIES OF NEW TECHNOLOGY PROCESS LUBRICANT

The results of theoretical and experimental studies of new brands of technological lubricants for cutting treatment of metals are presented.

Keywords: cutting of metals, technological environment, tribological properties.

В настоящее время современное машиностроительное производство, где большую долю операций составляет лезвийная обработка резанием, остро нуждается в использовании новых более прогрессивных отечественных марок смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС). Это объясняется тем, что с точки зрения повышения производительности обработки и улучшения качества обработанной поверхности сейчас наиболее «слабым» звеном технологического процесса является износостойкость режущего инструмента при наличии высокопроизводительного оборудования, ужесточении режимов резания, в условиях вовлечения в производство все больше труднообрабатываемых сталей и сплавов. Поэтому очевидна актуальность разработки и применения эффективных СОТС и как наиболее распространенного, доступного и экономически выгодного способа решения вышеизложенной проблемы [1].

Данная работа представляет собой комплексное теоретико-экспериментальное исследование новых отечественных марок СОТС и включает в себя решение вопросов: разработка методики экспериментальных исследований и ускоренных способов оценки эффективности технологических сред по трибологическим характеристикам применительно к различным операциям резания металлов; изучение механизма действия смазок, в частности влияния кинематической вязкости на интенсивность износа режущего инструмента, температурно-силовую нагруженность зоны контакта, прочность на срез адгезионных связей в зависимости от нормальных напряжений и индекс совместимости, соответствующий пластическому контакту; оптимизация разработки и выбора СОТС; назначение рациональных режимов резания при использовании смазок.

Разработана методика и проведены экспериментальные исследования влияния технологических сред на температуру и составляющие силы резания, коэффициент укорочения стружки, интенсивность износа режущего инструмента. Выполнены исследования при продольном и торцевом точении коррозионностойких сталей твердосплавными резцами с использованием СОТС «Росойл-101» и ее основы с различной кинематической вязкостью (4–80 сСт); резбонарезании (Сталь 40Х, 38ХА – Р6М5); сверлении (12Х18Н10Т, Сталь 40Х, 38ХА – Р6М5) и протягивании (Сталь 45, 40Х – Р6М5) с применением различных по химическому составу и кинематической вязкости сред отечественного производства («Росойл-ШБК», Росойл-101», «Росойл-167» и других сред серии «Росойл») и аналога-

ми других фирм-производителей («НСС-22», «Куртис-55», «ХС-63», «ЛЗ-СОИС-26-МО») в широком диапазоне изменения элементов режима резания; а также на адгезионной установке и по методике, описанной в [2] по определению прочности адгезионных связей на срез τ_n , адгезионной составляющей коэффициента трения f_m и индекса совместимости K_c для пар 12Х18Н9Т, 38ХА-ВК8 при комнатной температуре с использованием сред серии «Росойл» кинематической вязкостью (3–143 сСт).

По результатам этих исследований для сокращения сроков освоения новых марок СОТС разработаны математические модели, учитывающие как трибологические характеристики, так и физико-механическое состояние сред и позволяющие определить рациональные режимы обработки при их применении и экспресс-методики оценки их эффективности. Установлено, что с увеличением концентрации поверхностно-активных веществ в СОТС на масляной основе до определенного оптимального значения одновременно снижается уровень температурно-силовых зависимостей и интенсивности износа режущего инструмента при уменьшении параметров шероховатости, глубины и степени упрочнения. Эксперименты показали, что зависимости температуры и силы резания, интенсивности износа инструмента от кинематической вязкости имеют минимум при значениях 22–28 сСт. Причем существует тенденция, что при обработке на скоростях ниже оптимальной наиболее эффективны смазки с малой вязкостью и наоборот. Такой характер влияния вязкости среды объясняется главным образом тем, что с повышением вязкости, с одной стороны, возрастает смазывающий эффект, а с другой – уменьшается проникающая способность и снижается пластифицирующее воздействие.

Библиографический список

1. Латышев, В.Н. Повышение эффективности СОЖ / В.Н. Латышев. М.: Машиностроение, 1985. 64 с.
2. Шустер, Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел / Л.Ш. Шустер. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.

УДК 621.789

Д.А. Барчуков
Тверской государственный технический университет

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ
СТАЛИ НА ПРОЦЕССЫ ЕЕ УПРОЧНЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ
ОТПУСКА, ВЫПОЛНЯЕМОГО ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО
ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

Приведены сведения о назначении высокотемпературного отпуска быстрорежущих сталей, не содержащих остаточного аустенита, который устраняется в результате поверхностного пластического деформирования. Рассмотрен механизм дополнительного упрочнения деформированных быстрорежущих сталей в результате выполнения высокотемпературного отпуска. Описано влияние легирующих элементов в составе быстрорежущей стали на процессы ее упрочнения в результате выполнения высокотемпературного отпуска.

Ключевые слова: наплавленная быстрорежущая сталь, поверхностное пластическое деформирование, остаточный аустенит, твердость.

**INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION OF HIGH SPEED STEEL
ON HARDENING PROCESSES AS A RESULT OF TEMPERING AFTER
SURFACE PLASTIC DEFORMATION**

The information about the appointment of a high-temperature tempering of high-speed steels without retained austenite is presented. The retained austenite is eliminated by surface plastic deformation. The mechanism of additional hardening of deformed high-speed steels as a result of high-temperature tempering is reviewed. The influence of the alloying elements in the composition of the high speed steel on the processes on its hardening after high-temperature tempering is described.

Keywords: welding high speed steel, surface plastic deformation, retained austenite, hardness

Известен способ упрочнения наплавленных быстрорежущих сталей, который позволяет устранять в них остаточный аустенит за счет применения ударного поверхностного пластического деформирования (ППД) в процессе охлаждения после наплавки в температурном интервале мартенситного превращения [1].

Цель настоящего исследования – обоснование гипотезы о возможности в результате выполнения отпуска дополнительного упрочнения быстрорежущих сталей, не содержащих остаточного аустенита после ППД.

Известно, что отпуск является завершающим этапом термической обработки, при котором наследуются особенности первичной структуры на предшествующих этапах термической обработки. Данная структура

оказывает решающее влияние на окончательный уровень твердости, теплостойкости и, соответственно, на эксплуатационные характеристики и работоспособность быстрорежущих сталей.

При отпуске закаленной быстрорежущей стали могут протекать два противоположных по влиянию на прочность процесса: разупрочнение вследствие снижения концентрации углерода и легирующих элементов в мартенсите и упрочнение в результате дисперсионного твердения – выделения дисперсных частиц специальных карбидов и превращения остаточного аустенита (при его наличии) в мартенсит отпуска.

Дисперсные карбидные частицы повышают предел текучести стали, твердость, временное сопротивление, так как являются эффективными препятствиями на пути движения дислокаций. Эффективность упрочнения обуславливается количественным соотношением процессов разупрочнения и упрочнения.

Если в мартенсите растворено большое количество карбидообразующих элементов, а скорость коагуляции образуемых или обогащенных ими карбидов при данной температуре отпуска мала, то твердость мартенсита с повышением температуры отпуска будет изменяться по кривой с ясно выраженным вторичным максимумом. Возрастание твердости при температурах отпуска выше 300°C получило название вторичной твердости и ранее приписывалось только или главным образом превращению остаточного аустенита в мартенсит. Однако превращение остаточного аустенита не может дать такого повышения твердости, так как даже в стали с 0,78% С, закаленной с 1300°C, наличие остаточного аустенита понижает твердость только на 1...1,5 единицы HRC. В последнее время было показано экспериментально, что вторичный максимум твердости при отпуске наблюдается и в стали, в которой наличие остаточного аустенита исключается. В действительности вторичная твердость является в основном результатом процессов, протекающих при распаде мартенсита, сущность которых сводится к следующему.

При низких температурах отпуска из мартенсита выделяется легированный цементит. Так как при температуре от 150 до 300°C одновременно протекает и процесс коагуляции цементита, то твердость стали понижается. С дальнейшим повышением температуры отпуска последовательно выделяются карбиды хрома $M_{23}C_6$, ванадия и вольфрама. Следовало ожидать, что карбиды вольфрама должны выделяться раньше карбидов ванадия, однако экспериментальные данные показывают, что обеднение мартенсита ванадием начинается при более низких температурах отпуска и протекает с большей скоростью, чем обеднение его вольфрамом. Очевидно, в быстрорежущей стали, содержащей ванадий, сложный карбид вольфрама типа M_6C имеет повышенную температуру начала коагуляции. На основании того, что после отпуска в интервале 675...750°C в стали типа P18 был обнаружен метастабильный карбид W_2C , выделение которого замедляется

хромом, высказывается предположение [2], что этот же карбид выделяется и в интервале 500...675°C. Такое предположение недостаточно обосновано, так как в той же работе после отпуска при 500°C был найден карбид типа M_6C . Последовательное дисперсионное твердение выделяющимися карбидами не только компенсирует, но и превышает понижение твердости основной массы вследствие отпуска, что и обуславливает вторичную твердость, имеющую максимум при 550...560°C. Некоторую, но лишь дополнительную роль, может играть и превращение остаточного аустенита.

Приблизительно при 550°C вследствие того, что твердый раствор обогащен вольфрамом и хромом, становится возможным выделение из него интерметаллоидной фазы, представляющей собой либо твердый раствор хрома в Fe_7W_3 , либо тройное соединение железа с вольфрамом и хромом. Эта фаза может быть только промежуточной, метастабильной, и при дальнейшем повышении температуры отпуска и разложении твердого раствора заменяется карбидными фазами. Ее выделением можно объяснить обнаруживаемое при фазовом анализе увеличение содержания железа и значительное дальнейшее повышение содержания хрома в «карбидном» осадке быстрорежущей стали при температурах выше 550°C. Эта фаза обладает большой устойчивостью против коагуляции в широком интервале температур. Выделение ее в высокодисперсном состоянии должно, следовательно, не только вызвать некоторое дополнительное повышение твердости, но и замедлить ее падение при дальнейшем повышении температуры отпуска, обусловленное коагуляцией карбидных фаз.

Качественное повышение эксплуатационных свойств стали при отпуске определяется в основном структурой закаленной стали, т.е. для эффективного упрочнения стали при отпуске необходимо выбрать соответствующий состав стали и технологию ее закалки, при которых становится возможным получение в структуре закаленной стали максимальной концентрации легирующих элементов в твердом растворе. При этом количественное соотношение между этими легирующими элементами должно обеспечивать образование при отпуске высокодисперсных карбидов, обладающих максимальной устойчивостью к коагуляции, т.е. сохранением высокой теплостойкости. При этом количество эвтектических карбидов необходимо свести к минимуму, они должны быть дисперсными и равномерно распределенными по объему стали.

Закаленные быстрорежущие стали упрочняются при отпуске в результате дисперсионного твердения, т.е. выделения из пересыщенного углеродом и легирующими элементами мартенсита большого количества (до $10^{16} \dots 10^{18}$ 1/см³) мелких карбидных или интерметаллидных частиц наноразмера, которые задерживают перемещение дислокаций, упрочняют сталь.

Согласно теории легирования теплостойких инструментальных сталей, разработанной школой металлословесов-инструментальщиков, организованной профессором Ю.А. Геллером [2], твердость и теплостойкость быст-

рорежущих сталей тем выше, чем больше количество упрочняющих частиц и выше их свойства, в частности устойчивость против коагуляции, в процессе которой частицы укрупняются и, как следствие, уменьшается их количество, а также понижается твердость изготовленного из этих сталей инструмента, в том числе и при нагреве.

Упрочняющими фазами быстрорежущих сталей являются карбиды на основе вольфрама и молибдена (M_2C), ванадия (MC), железа и хрома ($M_{23}C_6$).

Количество упрочняющих карбидов увеличивается по мере повышения растворимости углерода и легирующих элементов в аустените и, следовательно, в мартенсите теплостойких сталей в результате закалки. Наибольшая растворимость в аустените характерна для хрома, далее – по мере уменьшения – молибдена, вольфрама и ванадия.

Свойства карбидов зависят от их химического состава и определяются соотношением концентрации легирующих элементов и углерода в мартенсите, из которого они выделяются в процессе отпуска. Чем больше вольфрама, молибдена, ванадия и углерода растворено в мартенсите, тем выше свойства упрочненной стали.

Карбиды MC на основе ванадия сравнительно мало упрочняют теплостойкие стали, так как растворимость ванадия в аустените этих сталей весьма ограничена и не превышает 1...1,5%.

Предельная температура отпуска, нагрев при которой позволяет получать наибольшую твердость быстрорежущих сталей за время, принятое в производстве (2...4 часа), не так сильно зависит от количества, природы и свойств упрочняющих фаз, как от температуры полиморфного $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения. Предельная температура отпуска сталей и сплавов, упрочняемых дисперсионным твердением, тем выше, чем выше температура их полиморфного превращения.

Количество растворимых и нерастворимых карбидов в быстрорежущих сталях примерно одинаковое. Чем больше углерода и легирующих элементов будет в растворе, тем больше дисперсных карбидов выделится при отпуске, следовательно, будет выше твердость и теплостойкость стали.

Если растворимые карбиды способствуют повышению твердости и теплостойкости, то нерастворимые – пределу прочности при изгибе и ударной вязкости.

Так как в результате применения ППД наплавленной быстрорежущей стали достигается двухфазная структура и остаточный аустенит практически отсутствует, можно предполагать, что увеличение твердости в результате выполнения отпуска возможно за счет сохранения высоколегированного твердого раствора и выделения мелкодисперсных равномерно распределенных в структуре стали карбидов.

С учетом вышеизложенного при реализации описанного способа упрочнения наплавленной быстрорежущей стали одной из приемлемых

марок быстрорежущих сталей является P2M8. Приемлемой как с технологической, так и с экономической точки зрения. Замена вольфрама молибденом в соотношении 1:1,5 позволяет уменьшить себестоимость быстрорежущей стали ввиду высокой стоимости вольфрама. Снижение содержания вольфрама обеспечивает возможность снижения карбидной неоднородности. Применение стали со сниженным содержанием вольфрама допустимо при изготовлении инструмента, работающего на щадящих режимах, не приводящих к нагреву в зоне резания до температур, превышающих теплостойкость режущей части.

Применением ППД в температурном интервале мартенситного превращения на стадии охлаждения наплавленной быстрорежущей стали с температур закалки достигаются получение в структуре стали тонкой и прерывистой сетки эвтектических карбидов и дополнительное их измельчение.

Получаемое мелкое зерно аустенита №№ 10...11 при закалке стали с температур кристаллизации при высоких скоростях охлаждения металла сварочной ванны при наплавке позволяет обеспечить высокие значения прочности при изгибе и ударной вязкости, а за счет уменьшения избыточных нерастворимых карбидов в результате повышения скоростей охлаждения – повысить концентрацию легирующих элементов в растворе [3]. В этом случае при отпуске существует возможность увеличить количество дисперсных карбидов и повысить твердость и теплостойкость быстрорежущей стали.

Образующиеся при отпуске дисперсные карбиды должны быть устойчивы к коагуляции. Чем выше устойчивость карбидов к коагуляции, тем выше твердость и теплостойкость. Наиболее устойчивым к коагуляции считается карбид M_2C . При образовании карбида $M_{23}C_6$ устойчивость к коагуляции карбидной фазы снижается [4].

В целях подтверждения гипотезы выполняли микроанализ на энергодисперсионном спектрометре *INCA ENERGY 350 X-MAX20*, функционирующем как аналитическая приставка, совместимая с растровым электронным микроскопом *JEOL JSM-6610LV*. Для исследования применяли две партии образцов наплавленной и упрочненной после ППД быстрорежущей стали P2M8: до и после выполнения двукратного отпуска при температуре 540°C и выдержке 40 мин каждый.

Установлено, что в стали P2M8 после наплавки и ППД суммарное количество легирующих элементов (*V, Cr, Mo, W*) в твердом растворе составляет 10,31...10,59%. Двукратный отпуск снижает количество легирующих элементов в твердом растворе незначительно, до уровня 8,6% по причине выделения из твердого раствора *W* в дисперсные вторичные карбиды M_2C размером 1...2 мкм, устойчивые к коагуляции по причине чуть более низкой температуры выполняемого отпуска.

При кристаллизации высокоуглеродистых молибденовых быстрорежущих сталей в их структуре формируется эвтектика на основе карбида

M_2C с высокой концентрацией молибдена (около 30%) и ванадия (около 20%). Карбиды M_2C имеют характерную для них вытянутую стержнеобразную форму и направленность и распадаются на более округлые и мелкие карбиды M_6C (2...5 мкм) и на многочисленные еще более мелкие карбиды MC (0,5...1 мкм).

Описанный выше способ упрочнения наплавленной быстрорежущей стали наряду с возможностью дополнительного упрочнения за счет выполнения одно- или двукратного отпуска нашел применение в технологиях изготовления режущего и штампового инструмента.

Была разработана энергоэффективная ресурсосберегающая технология изготовления резьбового резца с повышенной работоспособностью режущей части за счет применения наплавки инструмента порошковой проволокой ПП-Р2М8, ППД передней поверхности резца в процессе охлаждения при закалке наплавленной БРС и выполнения однократного высокотемпературного отпуска [5].

В соответствии с результатами производственных испытаний опытно-промышленной партии резьбового резца установлено повышение предельной стойкости инструмента относительно нормативной на 30%.

Библиографический список

1. Патент RU 2483120. Способ упрочнения наплавленных быстрорежущих сталей / Д.А. Барчуков, Н.С. Зубков, А.Ю. Лаврентьев, В.П. Водопьянова; опубл. 27.05.13. Бюл. № 15.
2. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
3. Барчуков, Д.А. Совершенствование структуры быстрорежущих сталей и повышение их работоспособности за счет термомеханических воздействий / Д.А. Барчуков, С.Е. Ильяшенко // Научное обозрение. 2013. № 3. С. 134-139.
4. Кремнев, Л.С. Особенности превращений, структуры и свойств молибденовых быстрорежущих сталей / Л.С. Кремнев Л.С., А.К. Онегина, Л.А. Виноградова // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 12. С.13-19.
5. Барчуков, Д.А. Ресурсосберегающая технология изготовления резьбового резца с упрочненной режущей частью / Д.А. Барчуков // Научное обозрение. 2012. № 5. С. 404-407.

УДК 621.793:620.178.1

А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова
Тверской государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ТОНКИХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ НИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

Выполнены измерения микротвердости тонких покрытий TiN , нанесенных методом ионно-плазменного напыления на подложки из различных металлов. Показана возможность оценки «истинной» твердости покрытий микронной толщины по резуль-

татам стандартных измерений микротвердости композиционной системы пленка-подложка с использованием модели, основанной на правиле смесей по поверхности.

Ключевые слова: микротвердость, покрытие, ионно-плазменное напыление

ESTIMATION OF MICROHARDNESS OF THIN ION-PLASMA NITRIDE COATINGS ON METAL SUBSTRATES

Microhardness of thin *TiN* layer, deposited on several metal substrates by ion-plasma spraying, has been measured. As is shown, conventional methods of measuring of microhardness of layer-substrate complex may be used for the estimation of μm -thin coating 'true' hardness by using the model, based on composition rule.

Keywords: microhardness, coating, ion-plasma deposition

Эксплуатационные характеристики деталей машин во многих случаях определяются поверхностными слоями малой толщины. Так, нанесение методом ионно-плазменного напыления нитридных тонких антифрикционных и износостойких покрытий является эффективным способом повышения работоспособности трибосопряжений [1].

Общепринятым способом оценки эксплуатационных свойств тонких поверхностных слоев является метод микротвердости. Кроме этого, микротвердость является параметром контроля технологического процесса нанесения покрытий. Однако при определении механических характеристик тонких поверхностных пленок возникают существенные погрешности, оказывающие влияние на корректность получаемых результатов, поскольку проникновение индентора внутрь образца определяется механическими свойствами не только пленки, но и подложки, причем с увеличением глубины проникновения вклад подложки возрастает.

В последние годы для определения твердости и модуля упругости поверхностных слоев используется метод непрерывного измерительного индентирования [2], основанный на непрерывной регистрации временных зависимостей нагрузки и глубины вдавливания индентора в исследуемый материал и последующего анализа кривых индентирования различными способами. Визуализация отпечатков в данном методе не предусмотрена. Площадь проекции отпечатка определяется по известной геометрии наконечника и контактной глубине индентирования, вычисленной по кривой нагружения-разгрузки.

Основы этого метода были разработаны в 1960-70 годах в СССР, где он был известен как метод «кинетической твердости» [3], однако распространение он получил в связи с появлением более совершенной, высокоточной аппаратуры для наноиндентирования. При использовании весьма малых нагрузок (несколько мН), когда заглубление индентора составляет всего несколько десятков нанометров (практически в пределах от 30 до 200 нм), метод считается вполне корректным для определения нанотвердости тонких поверхностных слоев и покрытий.

Однако при использовании метода измерительного индентирования существуют определенные погрешности, влияющие на получаемые результаты. Во-первых, возникают неточности в определении контактной площади по заглублению индентора из-за упругого вдавливания материала вокруг отпечатка индентора. Приборы измеряют не глубину отпечатка, а перемещение вершины индентора, состоящее из нескольких слагаемых. Нахождение непосредственно глубины контакта на основании результатов проведенных экспериментов производится расчетным методом и является весьма трудоемкой операцией [4]. Даже для таких пластичных материалов, как металлы и их сплавы, коэффициент упругого восстановления (отношение разности максимальной и остаточной глубин к величине максимальной глубины внедрения) составляет десятки процентов. В то же время упругое восстановление размеров отпечатка в плоскости поверхности незначительно [5], и сканирование рельефа с высоким разрешением позволяет определять площадь проекции с достаточной точностью.

Во-вторых, исследования кинетической твердости показали, что нельзя пренебрегать реологическими свойствами материала в контакте с индентором: на значение измеренной по данному методу твердости существенно влияют скорость заглубления индентора или продолжительность контакта [6].

Также на реализацию метода наноиндентирования существенные ограничения накладывает необходимость использования сложного дорогостоящего оборудования.

Традиционные методы измерения микротвердости вдавливанием пирамиды Виккерса по-прежнему широко используются в практике испытания композиционных систем пленка-подложка. При этом важно применение адекватной модели для выделения «истинной» твердости пленки из измеряемого значения твердости композиционной системы.

Для исключения вклада подложки в измеряемую твердость композиции пленка-подложка и определения твердости пленки было предложено несколько моделей [7, 8]. Модели для оценки твердости композиционной системы H_C основаны на правиле смесей. Согласно работе [9] H_C может быть представлена в виде

$$H_C = H_S + \alpha(H_F - H_S), \quad (1)$$

где H_S и H_F – твердость подложки и пленки; α – коэффициент, количественно определяющий вклад твердости пленки в измеряемую твердость и зависящий от модели для описания деформации.

В работе [10] предлагается определять коэффициент α как

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{h^2}{\beta t}}. \quad (2)$$

Наиболее широко в практике испытаний используется модель [7] правила смесей по поверхности, в которой

$$\alpha = 2c\left(\frac{t}{h}\right) - c^2\left(\frac{t}{h}\right)^2. \quad (3)$$

В формулах (2), (3) t – толщина пленки (покрытия); h – глубина внедрения индентора; β – параметр, имеющий размерность длины; c – коэффициент, значение которого зависит от геометрии индентора и от вида деформации пленки при индентировании.

Для случая вдавливания пирамиды Виккерса при пластической деформации пленки рассчитаны значения $c = 0,14$, а для хрупкого ее разрушения $c = 0,073$ [7, 11], для пирамиды Кнуппа 0,78 и 0,416, соответственно [12]. Выполненный в [8] анализ имеющихся в литературе данных по измерению материалов с покрытиями выявил значения коэффициента c в интервале от 0,08 до 0,66. В том числе отмечается, что эксперименты авторов [7] скорее приводят к значению $c = 0,3$.

В работе В.В. Измайлова [8] с помощью энергетического метода расчета усилия пластического формоизменения материала выполнен детальный анализ внедрения единичного жесткого выступа клиновидной формы в пластическое покрытие на пластическом основании. Рассмотрены случаи минимального и максимального контактного трения, а также вариант схемы деформации с так называемой застойной зоной (когда перед индентором движется жесткая зона материала). Результаты расчетов хорошо аппроксимируются формулами (1), (3) со значениями поправочного коэффициента для разных случаев схемы деформации $c = 0,25 \dots 0,45$.

Методика косвенного определения истинной микротвердости пленки на твердой основе предусматривает измерение микротвердости поверхности композиционной системы с пленкой H_C и подложки без пленки H_S и расчет твердости собственно пленки H_F с использованием формул (1), (3). Несмотря на значительные упрощения, эта модель находит хорошее экспериментальное подтверждение для пленок толщиной порядка долей микрометра. Вместе с тем в [13] отмечается, что она непригодна для твердых нитридных ионно-плазменных покрытий. Однако можно рассмотреть случай, когда глубина внедрения меньше толщины покрытия, что имеет место при измерении тонких, но твердых нитридных ионно-плазменных покрытий на стандартных микротвердомерах.

Рассмотрим поле линий скольжения при внедрении индентора в поверхность. При значениях угла при вершине индентора, соответствующих углу между гранями стандартной алмазной пирамиды Виккерса, равному 136° , даже при малых значениях коэффициента контактного трения преобладающей считается схема деформации с застойной зоной, показанная на рис. 1 [14].

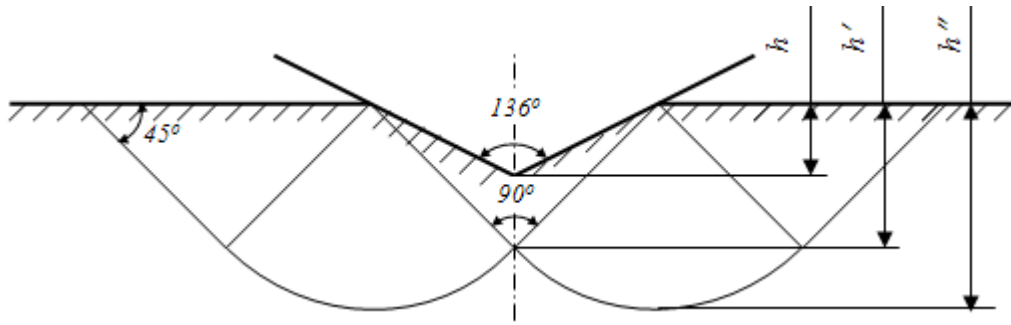


Рис. 1. Схема деформации при измерении твердости покрытий

По этой схеме под внедряющейся в материал пирамидкой образуется перемещающаяся вместе с ней зона материала с углом при вершине, равным 90° , которую можно рассматривать как жесткий индентор, заглубленный на величину h' . Пластическая деформация под индентором распространяется на еще большую глубину h'' , которая может превышать толщину покрытия. В этом случае деформации проникают как в материал покрытия, так и подложки, а комплексная измеренная твердость H_C может быть выражена как взвешенное значение твердости покрытия и подложки.

Для практического определения микротвердости нитридных ионно-плазменных покрытий, нанесенных на деформируемую основу, можно принять зависимости вида (1), (3), предложенные в работе [7], однако значения коэффициентов c в этой зависимости имеет смысл определить эмпирическим путем.

H_C , ГПа

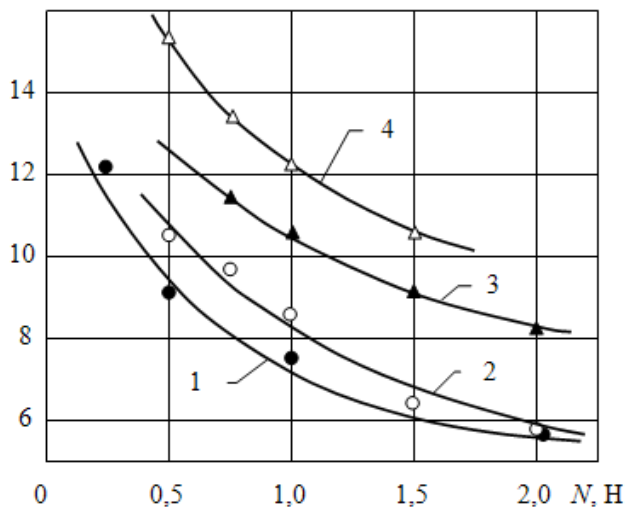


Рис. 2. Зависимость от нагрузки микротвердости покрытия TiN , напыленного на поверхности: 1 – титановый сплав ОТ4; 2 – стали 12С18Н9Т; 3 – вольфрама; 4 – инструментальной стали Р9

С этой целью были проведены измерения микротвердости покрытий из нитрида титана, напыленных на основы с различной твердостью в одном технологическом процессе. Материалы основы и их микротвердость приведены в таблице. Толщина покрытия, определенная по микрошлифам составляла $t = 2,5$ мкм. Измерения проводили при нагрузках от 0,5 до 2,0 Н. Результаты показаны на рис. 2 в виде зависимостей микротвердости H_C от нагрузки на индентор N . Убывающий характер всех зависимостей свидетельствует о том, что с увеличением нагрузки, т.е. глубины проникновения индентора, вклад более мягкой подложки в комплексную твердость увеличивается.

Обработку массива данных $H_C = f(H_S, h)$ выполняли методом итераций, в ходе которых задавали значение c и рассчитывали для всех нагрузок и материалов основы среднее значение микротвердости покрытия и дисперсию для рассчитанных значений H_F . По минимуму дисперсии были определены расчетные значения твердости покрытий из нитрида титана, приведенные в таблице, а также значения коэффициента c в формуле (3).

Удовлетворительное совпадение расчетных значений микротвердости покрытия TiN на материалах с различной твердостью подтверждает справедливость соотношений (1), (3). Среднее значение коэффициента $c = 0,34$, что хорошо согласуется с выводами работы [8].

Микротвердость H_F покрытия нитрида титана TiN на различных основах

Материал основы	Микротвердость основы H_S , ГПа	Расчетная микротвердость покрытия H_F , ГПа	Расчетное значение коэффициента c
Титановый сплав ОТ4	2,20	12,0	0,28
Сталь 12Х18Н9Т	3,16	10,6	0,35
Вольфрам	5,02	12,8	0,32
Сталь Р9	5,56	10,3	0,42

Таким образом, на примере нитридов тугоплавких металлов показана возможность оценки «истинной» твердости покрытий микронной толщины по результатам стандартных измерений микротвердости композиционной системы пленка-подложка с использованием модели, основанной на правиле смесей по поверхности.

Библиографический список

1. Нестерова, И.Н. Эксплуатационные свойства деталей с ионно-плазменными покрытиями / И.Н. Нестерова // Фрикционный контакт деталей машин: сб. научн. тр. Калинин: Изд-во КПИ, 1989. С. 136-139.
2. Oliver, W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // J. Mater. Res. 1992. V. 7. № 6. P. 1564-1583.
3. Булычев, С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Булычев, В.П. Алехин. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
4. Мощенок, В.И. Методы анализа кривой индентирования / В.И. Мощенок, Н.А. Лалазарова, И.Е. Кухарева, В.А. Скрипников // Вестник ХНАДУ. 2010. № 51. С. 65-68.
5. Demkin, N.V. Plastic contact under high normal pressure / N.V. Demkin, V.V. Izmailov // Wear. 1975. V. 31. № 2. P. 391-402.
6. Измайлов, В.В. Температурная и временная зависимости твердости конструкционных материалов / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев // Машиноведение. 1986. № 2. С. 100-104.
7. Jonsson, B. Hardness measurements of thin films / B. Jonsson, S. Hogmark // Thin Solid Films. 1984. V. 114. № 3. P. 257-269.

8. Измайлов, В.В. Влияние покрытий на процессы механического и электрического контактирования шероховатых поверхностей / В.В. Измайлов // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 6. С. 1026-1047.
9. Buckle, H. Use of the Hardness Test to Determine Other Material Properties / H. Buckle // The science of hardness testing and its research applications. Metals Park (OH): American Society for Metals, 1973. P. 453-494.
10. Korsunsky, A.M. On the hardness of coated systems / A.M. Korsunsky, M.R. McGurk, S.J. Bull, T.F. Page // Surface and Coating Technology. 1998. V. 99. P. 171-183.
11. Iost, A. Hardness of coatings / A. Iost, R. Bigot // Surface and Coating Technology. 1996. V. 80. № 1-2. P. 117-120.
12. Iost, A. Knoop hardness of thin coatings / A. Iost // Scripta Materialia. 1998. V. 39. № 2. P. 231-238.
13. Burnett, P.J. Assessment of coating hardness / P.J. Burnett, D.S. Rickerby // Surface Engineering. 1987. V. 3. № 1. P. 69-76.
14. Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. М.: Высшая школа, 1969. 608 с.

УДК 625.855.32

Д.Г. Масленников, А.В. Кондратьев, Ю.Н. Павлов
Тверской государственной технической университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БРИКЕТОВ ИЗ СУХОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

Установлено влияние компонентного состава стандартных асфальтобетонных смесей и влажности ненагретых исходных каменных материалов на прочность брикетов сухой асфальтобетонной смеси, применяемых для ремонта и строительства асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог.

Ключевые слова: каменные материалы, сухая асфальтобетонная смесь, брикетирование, прочностные характеристики брикетов.

STRENGTH PROPERTIES STUDY OF BRIQUETTES MADE OF DRY ASPHALT MIXES

The paper argued the influence of the component composition of standard asphalt mixes and moisture of unheated raw stone materials on the strength of briquettes of dry asphalt mix used for the repair and construction of asphalt concrete coverings of highways.

Keywords: stone materials, dry asphalt mix, briquetting, the strength characteristics of briquettes.

Особенностью применения сухой асфальтобетонной смеси (САБС), содержащей те же компоненты и в тех же пропорциях, что и горячая асфальтобетонная смесь, является то, что ее можно заготавливать, длительно хранить и транспортировать к месту укладки по мере необходимости. Для получения плотного асфальтобетона САБС необходимо нагреть [1]. Однако при транспортировании возникает проблема расслоения компонентов САБС.

Как один из вариантов решения этой проблемы предложена технология брикетирования САБС [2], которая позволяет сохранить однородность смеси.

Целью исследований являлось установление влияния компонентного состава асфальтобетонных смесей и влажности исходных материалов на прочностные свойства получаемых брикетов САБС.

Составы сухих асфальтобетонных смесей рассчитывали в соответствии с ГОСТ 9128-84 «Смеси асфальтобетонные, дорожные, аэродромные и асфальтобетон» на основе стандартных каменных материалов для горячих мелкозернистых щебеночных и песчаных смесей [3].

Условия проведения экспериментов были следующие. Влажность щебня составляла $w_{щ} = 0,5\%$, минерального порошка $w_{мп} = 0,8...1\%$, песка $w = 0,5...8,3\%$. Каменные материалы перед приготовлением асфальтобетонных смесей не были нагреты и имели температуру $t = 5...15^\circ\text{C}$. Для приготовления всех типов асфальтобетонных смесей использовали битум марки БНД-60/90 с температурой $t_6 = 160^\circ\text{C}$. Брикет САБС получали методом экструдирования на специально изготовленном автоматическом гидравлическом прессе. Длина и диаметр мундштука экструдера были соответственно $l_m = 180$ мм и $d_m = 80$ мм. Испытания брикетов на разрушение при сжатии проводили на лабораторном прессе ПСУ-125.

Зависимость прочности брикетов от процентного содержания песка по массе в асфальтобетонной смеси показана на рис. 1. Наряду с функцией усилия разрушения P была принята функция отклика длины брикетов l , которая также характеризует их прочностные свойства. В этой серии экспериментов влажность песка составляла $w = 1...1,5\%$, щебня $w_{щ} = 0,5\%$.

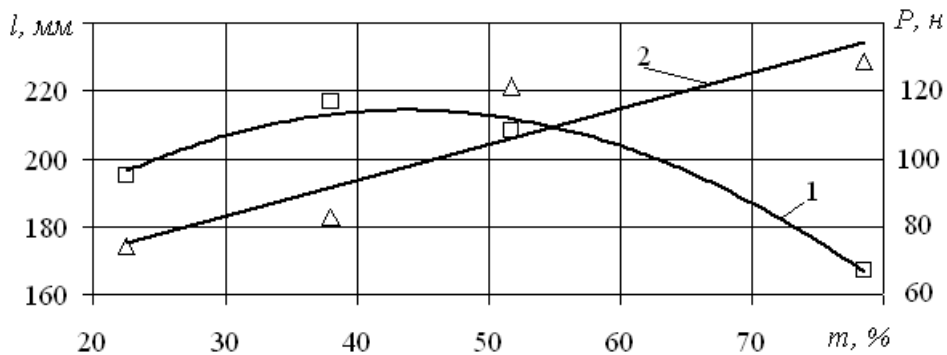


Рис. 1. Зависимость длины брикета l и усилия его разрушения P от процентного содержания песка m в САБС: 1 — $l = f(m)$; 2 — $P = f(m)$

Экспериментальные данные зависимости $l = f(m)$ и $P = f(m)$ в принятых пределах изменения массы песка m в САБС аппроксимируются уравнениями вида

$$l = 137,97 + 3,52m - 0,04m^2, \quad (1)$$

$$P = 66,13 + 0,74m. \quad (2)$$

При этом численные значения коэффициента корреляции для функции $P = f(m)$ составили $r = 0,9$, а корреляционное отношение для функции $l = f(m)$ $\eta = 0,92$, что указывает на тесную связь экспериментальных и расчетных данных.

Анализируя уравнение 1 (кривая 1, рис. 1), можно сделать вывод о том, что с увеличением процентного содержания песка в щебеночных смесях сначала наблюдается увеличение длины брикета, затем размер получаемых брикетов стабилизируется, а при переходе к смесям песчаного типа длина получаемых брикетов резко сокращается. В нашем случае длина l получаемых брикетов характеризует прочностное сопротивление брикета на изгиб, так как брикет обламывается при выходе из мундштука экструдера под весом вышедшей консольной части брикета. Из рис. 1 видно, что переход на песчаную смесь $m = 79\%$ приводит к резкому снижению сопротивления брикета на изгиб. Наиболее оптимальными значениями, обеспечивающими высокие показатели прочности на изгиб, следует считать брикеты, соответствующие щебеночным асфальтобетонным смесям с процентным содержанием песка по массе m от 34 до 52% при длине брикетов $l = 200 \dots 220$ мм.

Испытания полученных брикетов на разрушение при сжатии на прессе ПСУ-125 показали, что с увеличением процентного содержания песка в асфальтобетонной смеси усилие разрушения брикетов P увеличивается (уравнение (2)). Это, очевидно, объясняется более плотной структурой брикета с большим содержанием песка. Таким образом, брикеты, полученные из сухой асфальтобетонной смеси с процентным содержанием песка по массе $m = 40 \dots 60\%$, наиболее полно отвечают требованиям прочности, предъявляемым к брикетам САБС.

Для определения влияния влажности исходных материалов на прочностные свойства брикетов САБС были проведены исследования с изменением влажности песка, поскольку именно этот материал может набирать наибольшую влажность из всех компонентов смеси. Эксперименты проводили на исходной сухой асфальтобетонной смеси с процентным содержанием песка по массе $m = 55\%$. При этом влажность песка варьировалась в пределах $w = 0,5 \dots 8,3\%$. Полученные зависимости длины брикета l и усилия его разрушения P от влажности песка w представлены на рис. 2.

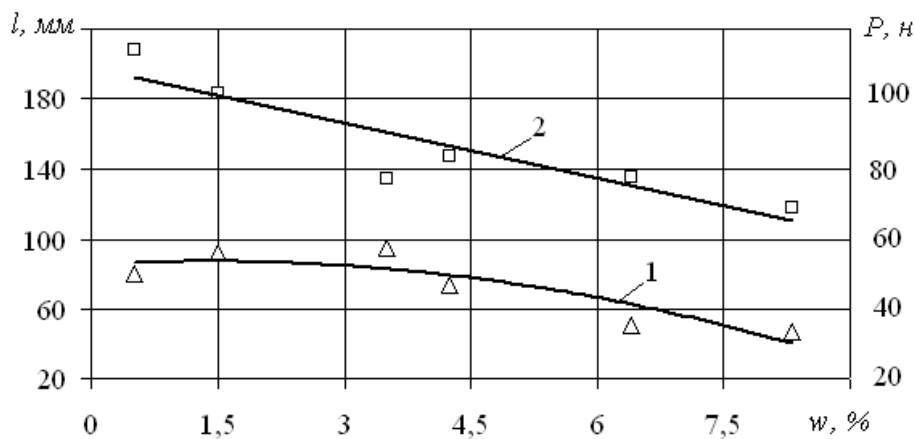


Рис. 2. Зависимость длины брикета l и усилия его разрушения P от влажности песка w в САБС: 1 – $l = f(w)$; 2 – $P = f(w)$

Приведенные зависимости описываются эмпирическими уравнениями:

$$l = 164,36 + 3,31w - 1,02w^2, \quad (3)$$

$$P = 111,62 - 9,44w. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) характеризуются достаточно высокими корреляционным отношением и коэффициентом корреляции, которые составляют соответственно $\eta = 0,82$ и $r = 0,89$.

Из приведенных исследований следует, что с увеличением влажности песка w в исходном материале длина брикетов l и усилие их разрушения P уменьшаются. Поэтому влажность песка в пределах $w = 0,5 \dots 1,5\%$ в исходном материале следует считать оптимальной для получения достаточно прочных брикетов САБС.

Экспериментально-статистические модели влияния компонентного состава исходной сухой асфальтобетонной смеси и влажности песка в ней на прочностные свойства получаемых брикетов САБС показывают, что наиболее прочные брикеты получаются из асфальтобетонных смесей с процентным содержанием песка по массе $m = 40 \dots 60\%$ при влажности песка $w = 0,5 \dots 1,5\%$.

Библиографический список

1. Масленников, Д.Г. Технология приготовления сухой асфальтобетонной смеси / Д.Г. Масленников // Тез. докл. 1-ой науч.-техн. конф. молодых ученых и специал. КПИ «Перестройке – энтузиазм и творчество молодых». Калинин, 1988. С. 69.
2. Разработка раздельной технологии и экспериментального оборудования для приготовления асфальтобетонной смеси: отчет о НИР тема №1/29; рук. А.Б. Мясников. Калинин: КПИ, 1989. 48 с.
3. Иванов Н.Н. Дорожный асфальтобетон / Н.Н. Иванов, Л.Б. Гезенцевей, И.В. Королев. М.: Транспорт, 1976. 336 с.

УДК 621.9.02; 621.791

А.Ю. Лаврентьев, И.А. Соколов, А.М. Дожделев, А.А. Хохлов
Тверской государственный технический университет

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗЕНКЕРОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассмотрены условия работы зенкеров. Описаны материалы для изготовления инструмента. Приводятся стандарты, регламентирующие требования к зенкерам. Предложен способ изготовления зенкера с применением технологии наплавки. Описано производство опытной партии инструмента.

Ключевые слова: зенкер, биметалл, инструментальные материалы, наплавка.

MANUFACTURING OF COUNTERSINKS WITH ENHANCED OPERATING CHARACTERISTICS FOR HOLE MAKING IN ENGINEERING PRODUCTS MADE OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS

The article describes the countersink operating conditions. Materials for tool manufacturing are described. The standards, governing the requirements for countersinks, are presented. The method of countersink making using the surfacing technology is described. The production of a pilot set of tools is described.

Keywords: countersink, bimetal, tool materials, surfacing.

Зенкер (нем. Senker) – многолезвийный режущий инструмент для обработки цилиндрических и конических отверстий в деталях с целью увеличения их диаметра, повышения качества поверхности и точности. Зенкерование является полуставкой обработкой резанием.

Зенкеры обеспечивают обработку отверстий с припуском под последующее развертывание (зенкер N1) или получения окончательного размера отверстия с качеством точности Н11 (зенкер N2) [1, 2]. Используют для зенкерования станки токарной группы, сверлильные и расточные станки всех типов. В ряде случаев могут быть использованы фрезерные станки.

По способу закрепления на станке зенкеры подразделяются на концевые и насадные.

Требования к зенкерам регламентируются несколькими стандартами:

- ГОСТ 1677-75 Зенкеры цельные и со вставными ножами из быстрорежущей стали;
- ГОСТ 2255-71 Зенкеры насадные со вставными ножами из быстрорежущей стали;
- ГОСТ 3231-71 Зенкеры, оснащенные твердосплавными ножами;
- ГОСТ 12489-71 Зенкеры. Конструкция и размеры.

Режущая часть зенкера в соответствии с ГОСТ может быть выполнена из быстрорежущей стали (P9, P6M5 и др.) или твердого сплава (BK8, T15K6). По согласованию с заказчиком допускается применение стали 9ХС. Хвостовик инструмента изготавливают из стали 45 или 40Х.



Рис. 1. Зенкер с пластинами из твердого сплава

В процессе работы зенкер подвергается комплексному воздействию. Для обеспечения требуемой стойкости инструментальный материал должен обладать высокой твердостью и теплостойкостью. Этим требованиям вполне соответствует твердый сплав (рис. 1). Однако инструмент из твердого сплава в ряде случаев работает ненадежно. При выполнении отверстий в труднообрабатываемых материалах (стальное литье 25Л, или по-

ковки с неравномерным припуском) припаянные пластины скалываются. Эту проблему удастся решить, повысив прочность и жесткость рабочей части, изготовив зенкер полностью из твердого сплава. Для больших диаметров такое решение ведет к чрезмерному удорожанию инструмента.

Применение цельных зенкеров из быстрорежущей стали снижает скорость обработки. Кроме того, использование цельной рабочей части не обеспечивает эффективного использования дорогостоящей быстрорежущей стали. Стойкость инструмента снижается особенно интенсивно в случае наличия на обрабатываемой поверхности пригара или других загрязнений. При обработке наплавленного металла или сварных швов зенкеры быстро выходят из строя из-за сколов режущей кромки. Такие проблемы были выявлены при обработке на машиностроительных предприятиях отверстий корпусов и шатунов компрессорного оборудования.

В соответствии с вышеизложенным цель предлагаемых исследований состоит в разработке способа изготовления зенкера с повышенными эксплуатационными характеристиками. Поставленную цель можно достичь, обеспечив максимальную жесткость рабочей части зенкера при высокой прочности и износостойкости инструментального материала.

Наиболее эффективным способом получения инструмента с повышенными эксплуатационными характеристиками является наплавка быстрорежущих сталей. При наплавке быстрорежущих сталей на режимах, обеспечивающих закалку наплавленного металла с температур кристаллизации, величина зерна и концентрация легирующих элементов в твердом растворе определяются способом и режимами наплавки. Эти параметры могут быть регулируемыми в широких пределах в целях уменьшения величины зерна и повышения концентрации легирующих элементов в твердом растворе [3, 4]. При соответствующем выборе способа и режимов наплавки практически отсутствуют факторы, сдерживающие дальнейшее повышение механических и эксплуатационных свойств наплавленных быстрорежущих сталей за счет уменьшения величины зерна и повышения концентрации легирующих элементов в твердом растворе [5].

В соответствии с требованиями заказчика был изготовлен зенкер для обработки отверстия $\varnothing 52$ Н11. Инструмент предполагалось использовать для обработки отверстий в головке шатуна поршневого компрессора. Для изготовления опытной партии зенкеров использовали заготовки из стали 45 ГОСТ 1050-88. Была разработана конструкция заготовки, учитывающая требования по обеспечению оптимального сечения наплавленного слоя (рис. 2). Перед наплавкой заготовки подвергали термической обработке (закалка + отпуск).

Инструменты изготавливали с применением электродуговой полуавтоматической наплавки порошковой проволокой. Защитный газ – аргон. Химический состав наплавленного металла наиболее близок марке P2M8. Для формирования наплавленного валика использовали медный кристалли-

затер, который располагали по передней поверхности заготовки. На рис. 3а показана рабочая часть зенкера после наплавки. Наблюдается достаточно большой припуск по вспомогательной задней поверхности инструмента.

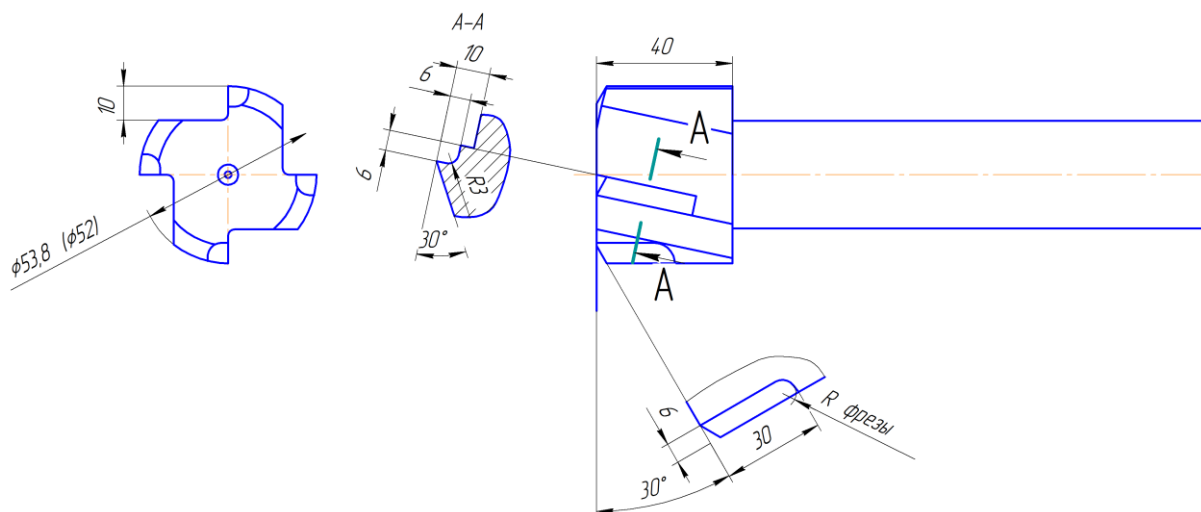


Рис. 2. Эскиз заготовки для зенкера



а



б

Рис. 3. Этапы изготовления зенкера: а – наплавленная рабочая часть зенкера; б – зенкер после шлифовки

После наплавки инструмент подвергали отпуску при температуре 560°C. После отпуска твердость наплавленного металла оказалась в диапазоне 60...64 HRC. На рис. 3б показан зенкер после окончательной шлифовки.

Были проведены испытания зенкеров в производстве шатунов. Инструмент показал хорошие эксплуатационные характеристики. По результатам работы десяти инструментов не зарегистрировано случаев скола режущей кромки. Уровень вибраций оборудования снизился. Это подтверждает повышение жесткости наплавленного инструмента. Стойкость наплавленного инструмента оказалась на 20% выше стойкости цельных зенкеров из быстрорежущей стали, изготовленных традиционным способом. В процессе дальнейших исследований более детально предполагается изучить процесс износа зенкера по методике, описанной в статье [6].

Библиографический список

1. Ординарцев, И.А. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев, Г.В. Филиппов, А.Н. Шевченко [и др.]. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. 847 с.
2. Гречишников, В.А. Справочник конструктора-инструментальщика / В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов. М.: Машиностроение, 2006. 524 с.
3. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. М.: Metallurgy, 1983. 527 с.
4. Переpletчиков, Е.Ф. Плазменно-порошковая наплавка режущего инструмента / Е.Ф. Переpletчиков, И.А. Рябцев // Сварочное производство. 2008. № 11. С. 19-21.
5. Лаврентьев, А.Ю. Упрочнение наплавленной быстрорежущей стали пластическим деформированием и термической обработкой / А.Ю. Лаврентьев, Д.А. Барчуков, Д.Н. Романенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1(46). С. 94-100.
6. Зоренко, Д.А. Экспериментальные исследования поверхностного слоя тормозного диска из стали 20X13 / Д.А. Зоренко, В.В. Мешков, В.Л. Хренов, Р.С. Варца, Л.Е. Афанасьева // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2008. С. 66-70.

УДК 620.179.112; 621.791

А.Ю. Лаврентьев, С.П. Рыков
Тверской государственной технической университет

ПОЛУЧЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗНОСОСТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПАТРУБКОВ УСТАНОВОК ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

В статье представлено описание способа получения патрубков для установок гидроабразивной обработки. Обоснована возможность применения технологии наплавки для изготовления износостойких элементов с повышенной работоспособностью. Приведены результаты исследований микроструктуры наплавленного слоя биметаллического материала.

Ключевые слова: биметалл, микроструктура, износостойкие материалы, наплавка.

PRODUCTION OF BIMETALLIC WEAR-RESISTANT MATERIALS FOR BRANCH PIPES OF HYDROABRASIVE TREATMENT UNITS

The article describes a method of branch pipes production for hydroabrasive treatment units. The possibility of application of surfacing technology for the production of wear-resistant elements with enhanced operability is justified. The results of studies of the microstructure of the deposited bimetallic layer are presented.

Keywords: bimetal, microstructure, wear-resistant materials, surfacing.

Очистка деталей в процессе изготовления оказывает существенное влияние на качество изделия. Особое внимание уделяется подготовке поверхности перед сваркой или наплавкой. Химические соединения (оксиды,

нитриды, гидраты), находящиеся на поверхности заготовки в зоне сварного соединения, снижают механические свойства наплавленного металла.

Существует большое количество методов очистки поверхности. Одним из наиболее эффективных является гидроабразивная обработка.

Однако при работе узлы установок для подачи суспензии подвергаются интенсивному гидроабразивному и кавитационному воздействию [1, 2]. В результате происходит износ входных и выходных патрубков, клапанов (в поршневых насосах), рабочих колес и корпусов в центробежных насосах, а также струйных аппаратов. Восстановление изношенных элементов – весьма трудоемкий и длительный процесс, требующий специальных технологий и приводящий к простоям оборудования [3].

Повышение работоспособности узлов установок возможно за счет использования материалов с высокой износостойкостью в условиях гидроабразивного изнашивания. Для изготовления деталей в форме патрубков возможно использовать способ, описанный в патенте РФ [4].

Экономия быстрорежущей стали при изготовлении наплавленных деталей может достигать 90%. Современные способы наплавки позволяют изготавливать биметаллические изделия с использованием сталей и сплавов практически любого состава, независимо от твердости, прочности, степени легирования и других свойств при регулируемом проплавлении основного металла. Наплавленный металл может иметь твердость 63–66 HRC после наплавки и высокотемпературного отпуска. Высокие механические и эксплуатационные свойства наплавленной быстрорежущей стали достигают за счет термического цикла наплавки, при котором обеспечивается сохранение высоколегированного аустенита при охлаждении в высокотемпературном интервале [5, 6].

В промышленности используется несколько методов изготовления деталей в форме патрубка с отверстием. Основная проблема при изготовлении биметаллической втулки – получение отверстия в наплавленном износостойком слое. При наплавке некоторые материалы обеспечивают получение твердости более 70 HRC. Для формирования рабочей поверхности матрицы в работе [6] применяли лазерную резку. Другой известный способ, позволяющий получить приемлемую точность поверхности при наплавке, – использование формирующих элементов. Последовательность изготовления патрубка показана на рис. 1.

Для изготовления патрубков диаметром 8...12 мм необходимо обеспечивать интенсивное охлаждение формирующего элемента из меди, поэтому от нее отказались. Графит оказался более эффективным. В связи с науглероживанием наплавленного металла в зоне контакта с графитовой вставкой наблюдалось увеличение твердости металла выше 1180 HV. Для производства экспериментального образца (рис. 2) использовали одноразовый формирующий элемент из графита. Проводили электродуговую наплавку порошковой проволокой в среде аргона.

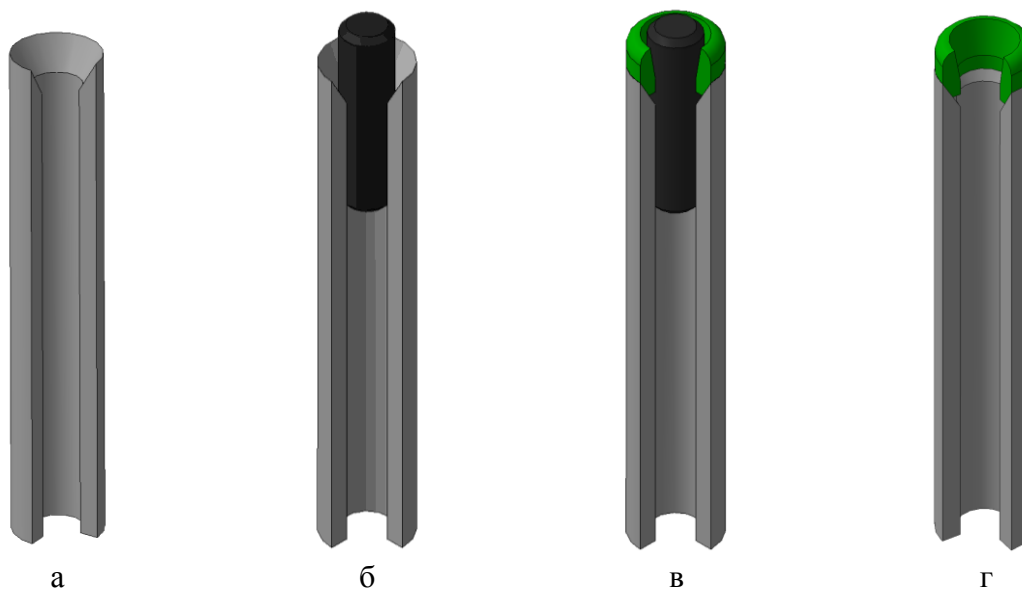


Рис. 1. Последовательность изготовления износостойкого патрубка с применением наплавки: а – заготовка; б – заготовка перед наплавкой с установленным формирующим элементом; в – наплавленный патрубок; г – патрубок с удаленным формирующим элементом

Исследование структуры наплавленного металла проводили с помощью металлографического микроскопа МИМ-8. Структура полученного сплава представлена на рис. 3. Повышение износостойкости при гидроабразивном износе обеспечивается за счет получения большего количества карбидов (на снимке хорошо различима ледебуритная сетка).

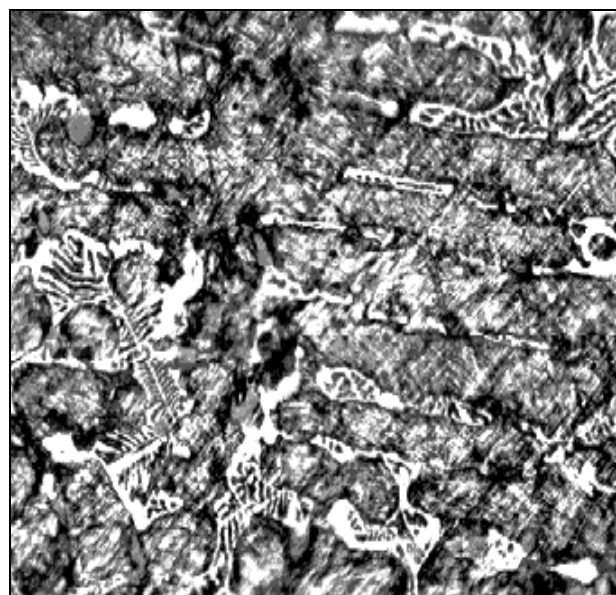


Рис. 2. Наплавленный образец патрубка Рис. 3. Микроструктура наплавленного металла

Предложенный способ изготовления патрубков для устройств подачи гидроабразивной суспензии с применением наплавки обеспечил повышение работоспособности изделия.

Библиографический список

1. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение. 2003.
2. Гуляев, Б.Б. Очистка отливок / Б.Б. Гуляев. Л.: Машиностроение, 1969.
3. Лаврентьев, А.Ю. Перспективы исследований по повышению износостойкости деталей насосов для подачи гидроабразивной суспензии / А.Ю. Лаврентьев, Е.И. Авдейчик // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТГТУ, 2007. Вып. 3. С. 61-63.
4. Патент RU № 2452780. Способ упрочнения разделительного штампа / Н.Н. Зубков, С.Е. Ильяшенко, В.П. Водопьянова, Л.Е. Афанасьева, А.Ю. Лаврентьев; заявл. 28.02.2011; опубл. 10.06.2012.
5. Афанасьева, Л.Е. Изготовление рабочих частей разделительных штампов с применением наплавки и лазерной обработки / Л.Е. Афанасьева, В.П. Водопьянова, Н.С. Зубков, А.Ю. Лаврентьев // Сварщик. 2011. № 5. С. 36-38.
6. Афанасьева, Л.Е. Увеличение ресурса разделительных штампов с применением наплавки / Л.Е. Афанасьева, В.П. Водопьянова, Н.С. Зубков, А.Ю. Лаврентьев // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. № 4. С. 15-17.

УДК 621.873

В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, Д.А. Романов
Тулский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ СТ3

Проведено испытание на статическое растяжение образцов из стали Ст3. Получены магнитограммы и графики распределения значений магнитного показателя. Полученные данные будут использованы совместно с данными испытаний на многоцикловую усталость при расчете остаточного ресурса грузоподъемных машин.

Ключевые слова: метод магнитной памяти металла, статическое растяжение.

STUDY OF THE MAGNETIC INDICATOR VALUES DISTRIBUTION AT A STATIC TENSION OF CT3 STEEL SAMPLES

The static tensile test of Ст3 steel specimens were carried out. The magnetograms and distribution graphs of magnetic indicator values were obtained. The data obtained will be used in conjunction with the test data on multi-cyclic fatigue when calculating the residual life of lifting machines.

Keywords: method of metal magnetic memory, static tension.

Метод магнитной памяти металла (МПМ) – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) на поверхности изделий с целью определения зон концентрации напряжений (КН), дефектов, неоднородности структуры металла и сварных соединений [1]. Магнитная память ме-

талла – последствие, которое проявляется в виде остаточной намагниченности металла изделий и сварных соединений, сформировавшейся в процессе их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле, или в виде необратимого изменения намагниченности изделий в зонах концентрации напряжений (ЗКН) и повреждений от рабочих нагрузок. Собственное магнитное поле рассеяния изделия – магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности изделия в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений или в зонах максимальной неоднородности структуры металла на новых изделиях. Основные преимущества метода по сравнению с известными магнитными и другими методами неразрушающего контроля (НК): применение метода не требует специальных намагничивающих устройств; места концентрации напряжений от рабочих нагрузок определяются в процессе их контроля; подготовки контролируемой поверхности не требуется; при контроле используются приборы с малыми габаритами и автономным питанием; специальные сканирующие устройства позволяют проводить контроль со скоростью более 100 м/час; существует возможность произвести расчет остаточного ресурса металлоконструкции объекта. Недостатками же данного метода можно назвать невысокую точность обнаружения месторасположения дефекта; проблему классификации дефекта. Основная задача метода – определение на объекте контроля наиболее опасных участков, характеризующихся зонами КН. Затем с использованием, например, ультразвуковой дефектоскопии (УЗД) в зонах КН определяется наличие конкретного дефекта. Метод МПМ является наиболее пригодным для практики методом НК при оценке фактического напряженно-деформированного состояния, позволяет выполнить интегральную оценку состояния узла с учетом качества металла, фактических условий эксплуатации и его конструктивных особенностей. Поэтому использование нового метода диагностики наиболее эффективно для оценки ресурса узлов оборудования и металлоконструкции объекта.

На основе зависимостей, установленных между механическими и магнитными показателями деформационной способности металла, разработан способ определения предельного состояния узлов, оборудования и конструкций, предшествующего их повреждению (разрушению) по магнитным диагностическим параметрам.

Для расчетов должны быть известны: 1) среднее значение $K_{ин}^{cp}$ (средневзвешенное значение градиента поля, полученное расчетом по результатам его измерений на образце при разных числах циклов нагружения до момента его заметного роста), соответствующее уровню сдвиговой (пластической) деформации в ЗКН при превышении внешней нагрузкой среднего уровня внутренних напряжений (определяется по результатам измерений на практике); 2) фактическое значение $K_{ин}^{\phi}$, измеренное в данной

зоне КН, и фактическая наработка данного узла T_ϕ на дату контроля. Предельное время эксплуатации $T_{пр}$ узла можно рассчитать следующим образом [1, 2]:

$$T_{пр} = \frac{d_{пр}}{d_\phi} \times T_\phi,$$

где $d_{пр} = \sqrt{m_{пр}}$ – известно из лабораторных или промышленных исследований; $m_{пр}$ – магнитный показатель предельного деформационного упрочнения); $d_\phi = \sqrt{m_\phi} = \sqrt{\frac{K_{ин}^\phi}{K_{ин}^{ср}}}$ – получено на основании измерений.

Таким образом, остаточный ресурс контролируемого узла с ЗКН составит

$$T_{рес} = T_{пр} - T_\phi.$$

Предлагаемый способ определения предельного состояния металла в зоне КН и оценки ресурса оборудования основан на принятом допущении о линейной временной зависимости процессов накопления пластической деформации и усталости металла. На момент контроля магнитный параметр $K_{ин}$ характеризует фактическое энергетическое состояние металла в зоне КН. При этом не важно, каким образом (по какой зависимости от параметров нагрузки) было достигнуто данное энергетическое состояние. Металл в ЗКН с течением времени как бы скачками переходит из одного энергетического состояния в другое. Если удастся зафиксировать значения K_m в разные периоды времени, то мы получим линейную зависимость $K_{ин} = f(T)$ по фиксированным моментам (точкам) различного энергетического состояния металла в ЗКН.

Метод МПМ является наиболее пригодным для практики методом НК при оценке фактического напряженно-деформированного состояния, позволяет выполнить интегральную оценку состояния узла с учетом качества металла, фактических условий эксплуатации и его конструктивных особенностей. Поэтому использование этого метода диагностики наиболее эффективно для оценки ресурса узлов оборудования и металлоконструкции объекта.

В настоящее время метод МПМ нашел широкое применение в области диагностики магистральных трубопроводов и металлоконструкций иных объектов промышленности, а также является наименее трудоемким в отличие от других методов, поэтому целесообразно применение данного метода при обследовании грузоподъемных машин. Однако в настоящее время расчет остаточного ресурса данным методом производится только на объектах трубопроводов, так как проведенные компанией-разработчиком ООО «Энергодиагностика» лабораторные испытания были адаптированы к этим объектам по маркам сталей, цикличности нагрузок (в обла-

сти малоцикловой усталости) и внешним факторам. На данный момент не представляется возможным определение остаточного ресурса грузоподъемных машин (ГПМ) из-за отсутствия соответствующей методики оценки остаточного ресурса методом МПМ, основанной на результатах экспериментальных исследований. Таким образом, цель исследования заключается в разработке методики оценки остаточного ресурса несущих металлоконструкций ГПМ методом МПМ.

Было проведено экспериментальное исследование изменения магнитного показателя m для образцов из стали Ст3 при статическом ступенчатом нагружения до разрушения. Рабочее сечение образца составляет 120 мм^2 . Конструкционную углеродистую сталь обыкновенного качества Ст3 применяют для изготовления несущих и ненесущих элементов сварных и несварных конструкций, а также деталей, работающих при положительных температурах. Листовой и фасонный прокат 5 категории (до 10 мм) – для несущих элементов сварных конструкций, предназначенных для эксплуатации в диапазоне температур от -40 до $+425^\circ\text{C}$ при переменных нагрузках.

При сканировании образцов после проведенных серий статических испытаний на растяжение методом магнитной памяти металла получены магнитограммы (для повышения точности измерений проводились серии сканирований, состоящие из 5 замеров при каждой ступени нагружения). По данным магнитограмм произведен анализ изменения магнитного показателя m на различных этапах статического нагружения, который представлен на рис. 1. Распределение средних значений магнитного показателя m на данном образце представлено на рис. 2.

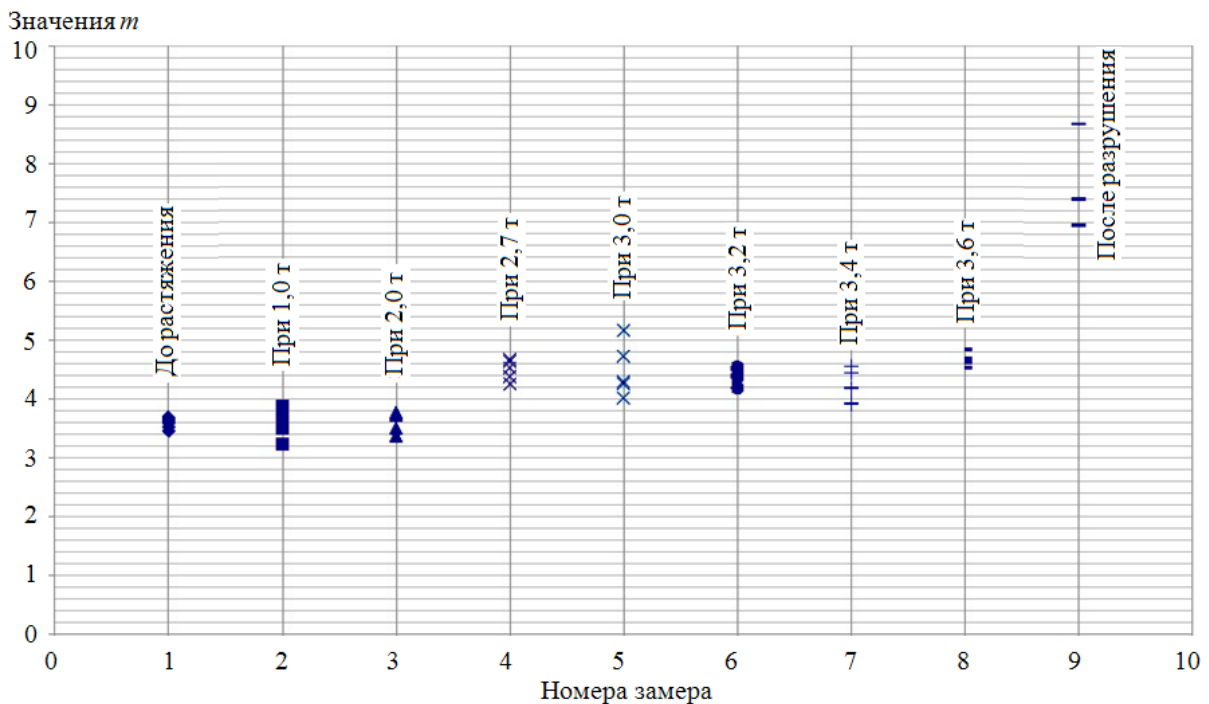


Рис. 1. Зависимость значения m от нагрузки на образец

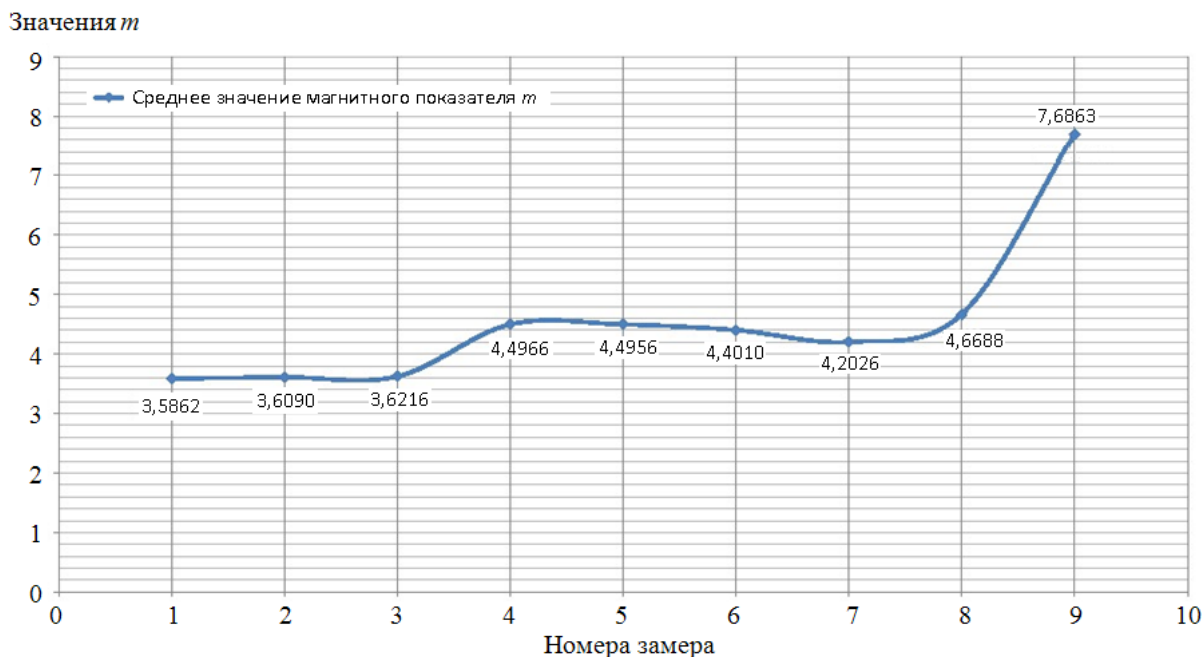


Рис. 2. Зависимость среднего значения m от нагрузки на образец

При анализе полученных данных при статических нагружениях не удается однозначно установить закономерность изменения напряженности магнитного поля от нагрузки на образец. Магнитный показатель m (см. рис. 1) сначала убывает, а затем возрастает.

Основываясь на полученных данных, а также на том, что крановые конструкции, как правило, работают в области многоциклового усталости, можно сделать вывод о необходимости проведения дальнейших испытаний на усталость образцов из разных марок сталей с целью получения необходимых данных для расчета остаточного ресурса грузоподъемных машин на основе МПМ. В настоящее время на кафедре «Подъемно-транспортные машины и оборудование» Тульского государственного университета проводятся исследования изменений магнитного показателя при испытаниях гладких образцов из стали Ст3 в области многоциклового усталости.

Библиографический список

1. Дубов, А.А. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля: уч. пособие / А.А. Дубов, Ал.А. Дубов, С.М. Колокольников. М.: Спектр, 2012. 395 с.
2. Власов, В.Т. Физические основы метода магнитной памяти металла / В.Т. Власов, А.А. Дубов. М.: ЗАО «Тиссо», 2004.

УДК 621.9.048.7

Ю.А. Соколов
НТК «Электротехника», г. Ржев Тверской области,
Л.Е. Афанасьева, М.В. Новоселова
Тверской государственный технический университет,
Р.М. Гречишкин
Тверской государственный университет

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННОГО ПО ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ

Представлены результаты экспериментальных исследований триботехнических свойств сплава титана ВТ6, полученного по технологии синтеза изделий электронным лучом.

Ключевые слова: микроструктура, износостойкость, сплавы титана, послойный электронно-лучевой синтез.

TRIBOENGINEERING PROPERTIES OF TITANIUM ALLOYS OBTAINED BY THE TECHNOLOGY OF ELECTRON BEAM SYNTHESIS OF PRODUCTS

The results are presented of an experimental study of triboengineering properties of titanium alloy ВТ6 prepared by the technology of electron beam synthesis of products.

Keywords: microstructure, wear resistance, titanium alloys, layerwise electron beam synthesis.

Разработка новых технологий модифицирования свойств металлических изделий является приоритетным направлением развития современного производства. Принципиально новые возможности в этой области открывает использование концентрированных потоков энергии, и прежде всего, электронно-лучевой синтез [1–6]. В основу технологии синтеза изделий электронным лучом (СИЭЛ) положена операция последовательного плавления слоя гранул в вакууме, что особенно важно для химически активных металлов, в частности для сплавов титана. Параметрами, характеризующими процесс электронно-лучевого плавления, являются: Q – мощность электронного пучка; q – удельная поверхностная мощность в месте встречи пучка с объектом; $V_{ск}$ – скорость сканирования луча по поверхности.

Одновременно с синтезом изделия происходит послойное формирование его структуры. Технология СИЭЛ открывает новые возможности по созданию материалов из гранул с программированной структурой и заранее прогнозируемыми свойствами.

Настоящая работа посвящена исследованию триботехнических свойств сплава титана ВТ6, полученного на базе технологии СИЭЛ.

Методика эксперимента. Изучаемые образцы сплава титана ВТ6 получены в результате выполнения следующих технологических опера-

ций. Методом газового распыления были получены сферические гранулы. Синтез образцов из сферических гранул сплава ВТ6 выполнен на электронно-лучевой вакуумной установке.

Испытание на изнашивание образцов сплава титана ВТ6 проводили о закрепленный абразив по схеме шар – плоскость. В качестве контробразца использовали стальной сферический наконечник с алмазным напылением (рис. 1). Диаметр наконечника равен 1,3 мм, размер алмазного зерна ≈ 25 мкм.

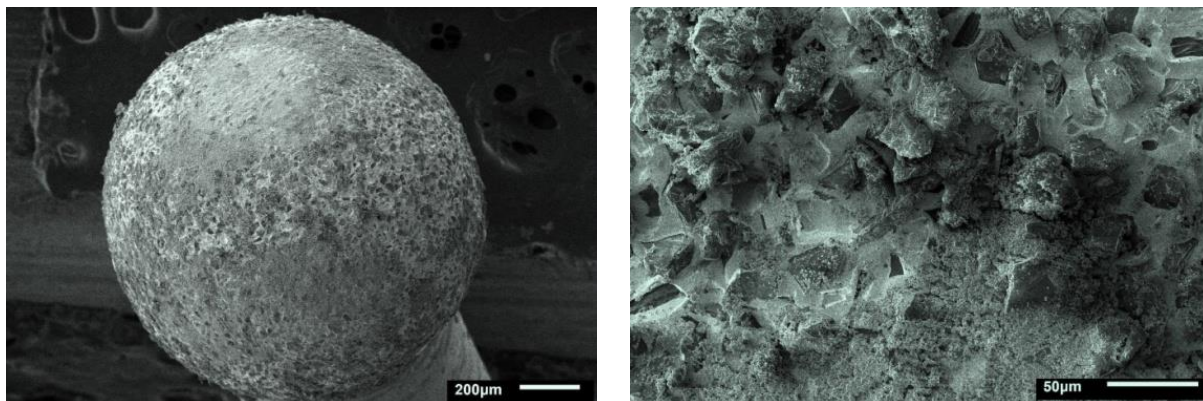


Рис. 1. Внешний вид контробразца с алмазным напылением после испытаний

К контакту прикладывали нагрузку в 50 г ($N = 0,49$ Н). Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца осуществлялись электро-механическим приводом с питанием от генератора импульсов с частотой $\nu = 20$ Гц. За один период (цикл) путь трения L_1 составлял 8...12 мм. Каждый образец подвергался испытанию в течение $t = 11,5$ часов. Общий путь трения составлял $L_{тр} = 6700...10100$ м. Далее с поверхности образцов перпендикулярно дорожке изнашивания были сняты профилограммы. По профилограмме определяли ширину D и максимальную глубину h_{max} дорожки изнашивания. Далее рассчитывали характеристики изнашивания образца: линейный износ за цикл I ; скорость изнашивания u ; линейную интенсивность изнашивания I_h ; объемную интенсивность изнашивания I_V :

$$I = h_{max}/(\nu t), \quad u = V/t,$$

$$I_h = h_{max}/L_{тр}, \quad I_V = V/L_{тр},$$

где V – объемный износ (объем канавки износа).

Микроструктуру сплава исследовали методами оптической и растровой электронной микроскопии на универсальном микроскопе *JEOL 6610LV* (Япония). Микротвердость измеряли на отечественном микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ Р 8.748-2011(ИСО 14577-1:2002).

Полученные результаты и обсуждение. По данным зарубежной печати [7–10] из общего объема используемых в авиакосмической промышленности сплавов на основе титана именно на сплав состава ВТ6 приходится более 50%. Это сплав применяется для изготовления крупногабарит-

ных сварных и сборных конструкций летательных аппаратов, баллонов, работающих под внутренним давлением в широком интервале температур и целого ряда других изделий. Химический состав сплава ВТ6 по ГОСТ 19807-91 представлен в табл. 1.

Таблица 1. Процентное содержание элементов в сплаве ВТ6

<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>V</i>	<i>N</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>Zr</i>	<i>O</i>	<i>H</i>	Примесей прочих
≤ 0,6	≤ 0,1	≤ 0,1	3,5–5,3	≤ 0,05	86,45–90,9	5,3–6,8	≤ 0,3	≤ 0,2	≤ 0,015	0,3

Для синтеза изделий могут использоваться гранулы, полученные методом центробежного распыления вращающейся заготовки и методом газового распыления. В качестве примера на рис. 2. показан внешний вид гранул титанового сплава ВТ6, полученных данными методами. Метрические параметры гранул, полученных методом центробежного распыления значительно улучшены по сравнению с газовым распылением.

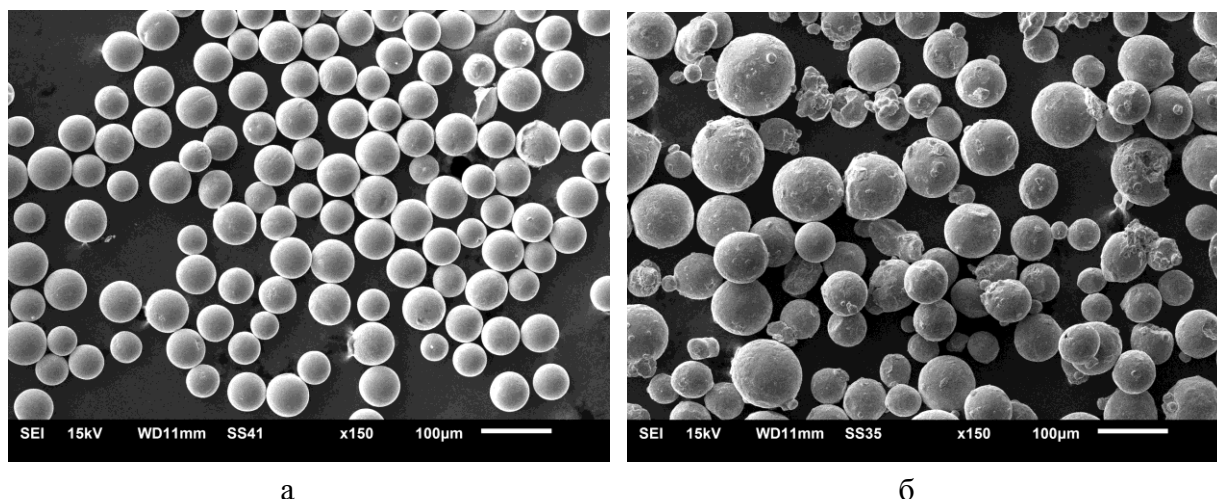


Рис. 2. Гранулы титанового сплава ВТ6, полученные:

а – методом центробежного распыления; б – методом газового распыления.

Растровая электронная микроскопия, условия съемки идентичны

Внешний вид полученных по технологии СИЭЛ образцов сплава титана ВТ6 показан на рис. 3.

Микроструктура сплава ВТ6, выявленная химическим травлением, представлена на рис. 4. Этот сплав по классификации, предложенной С.Г. Глазуновым, относится к ($\alpha + \beta$)-сплавам [7]. Мартенсит в титановых сплавах имеет пластинчатую микроструктуру. α -пластины разделены прожилками β -фазы. Так как происходил послойный синтез образца, в микроструктуре наблюдается текстура, что может вызывать анизотропию свойств. Необходимо отметить высокую дисперсность α - и β -фаз. Измельчение зерна и фазовых составляющих, как правило, приводит к повышению комплекса механических свойств – прочности, пластичности, вязкости.

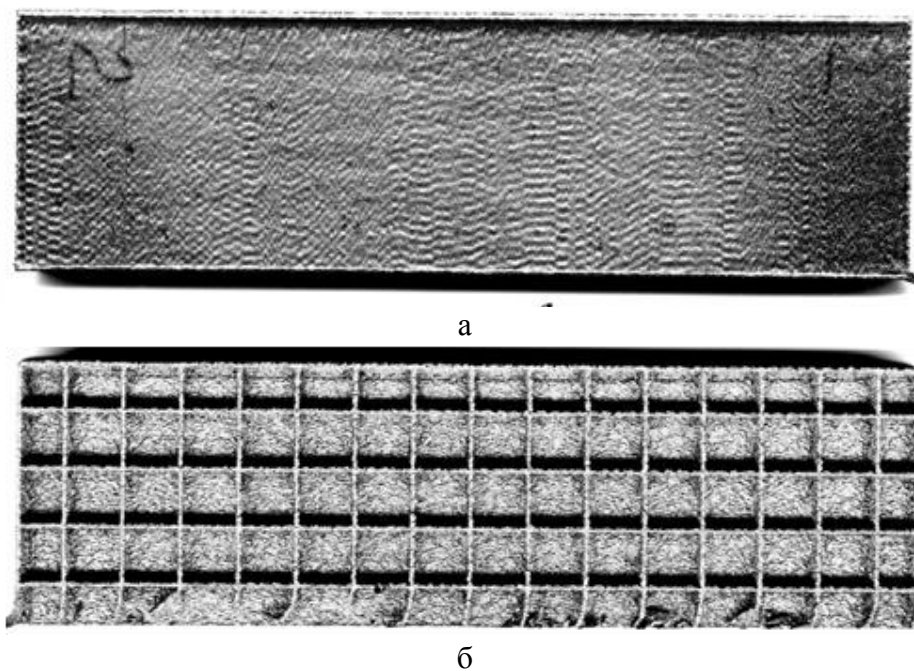


Рис. 3. Опытный образец сплава ВТ6, изготовленный по технологии СИЭЛ:
а – вид сверху; б – вид снизу

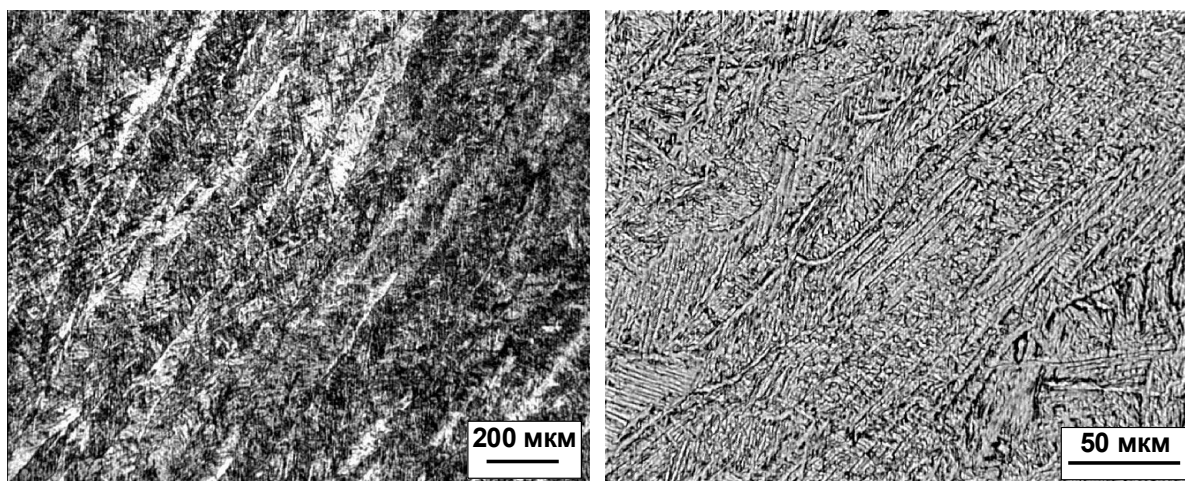


Рис. 4. Микроструктура сплава ВТ6, полученного по технологии СИЭЛ.
Оптическая микроскопия

Титановые сплавы используются для изготовления деталей и узлов, в которых изнашивание является одним из основных видов разрушения изделия. В подобных случаях необходимы специальные триботехнические испытания материалов (Межгосударственный стандарт ГОСТ 30480-97 Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общие требования). Для оценки ресурса изделий по критериям износостойкости на стадии проектирования необходимы проведение испытаний на износ и получение триботехнических характеристик разрабатываемых материалов для обоснования их преимуществ при проектировании изделий. Результаты предварительных испытаний на абразивный износ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики изнашивания исследованных образцов

Линейная интенсивность изнашивания I_h , 10^{-9}	49,8
Объемная интенсивность изнашивания I_V , 10^{-15} м^2	39,0
Линейный износ за цикл I , 10^{-8} мм/цикл	44,0
Скорость изнашивания u , 10^{-3} мм ³ /ч	25,5

Изображение продуктов износа изучаемых образцов представлено на рис. 5.

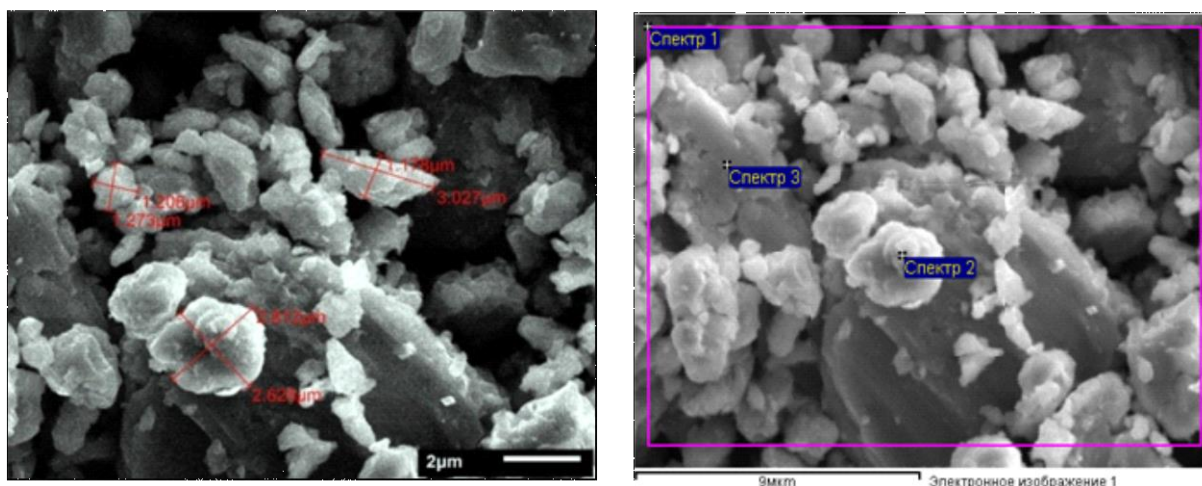


Рис. 5. Продукты износа образцов титанового сплава BT6

Результаты энергодисперсионного микрохиманализа продуктов износа образцов представлены в табл. 3. На рис. 5 указаны области анализа. Спектр 1 – химанализ выполнялся в выделенном прямоугольнике, спектры 2 и 3 – в точке размером около 1 мкм.

Микроанализ показал, что продукты износа представляют собой оксиды титана и легирующих элементов.

Твердость определяли вдавливанием в поверхность материала алмазного индентора в виде пирамиды. Величину твердости HV оценивали по нормальному усилию F_{max} на индентор и площади отпечатка A_p согласно [11]:

$$HV = \frac{F_{max}}{A_p}$$

Значения чисел твердости представлены в табл. 4.

Таблица 3. Микрохиманализ продуктов износа сплава BT6

Спектры	O	Al	Ti	V
Спектр 1	15,55	3,56	76,56	4,33
Спектр 2	0,35	6,35	90,54	3,47
Спектр 3	12,21	5,13	79,33	3,34

Таблица 4. Микротвердость сплава титана BT6

Усилие, Н	Микротвердость, МПа
1,47	4058,8±46,6
0,98	3955,5±113,1
0,49	4572,2±72,1

Измерение микротвердости выполняли на предварительно шлифованной и полированной поверхности. При усилии на индентор 0,49 Н получены повышенные значения микротвердости, что вероятно связано с пластическим деформированием поверхностных слоев образца при подготовке шлифа.

Выводы. Выполненные экспериментальные исследования показали перспективность получения сплава ВТ6 по технологии СИЭЛ. Требуется проведение дальнейших комплексных исследований по определению механических и технологических характеристик сплава, их зависимости от параметров синтеза и последующих обработок.

Библиографический список

1. Рыкалин, Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
2. Соколов, Ю.А. Установка «ЭЛУ-27»: новые возможности электронно-лучевых технологий / Ю.А. Соколов, И.В. Скворцов // Технология и оборудование электронно-лучевой сварки – 2011. Материалы второй международной научно-технической конференции. СПб.: ООО Агентство «ВиТ-Принт», 2011. С. 194-202.
3. Соколов, Ю.А. Получение композиционных материалов с программируемой структурой из гранул различного химического состава методом послойного электронно-лучевого синтеза / Ю.А. Соколов // Металлообработка. 2013. № 3. С. 47-51.
4. Соколов Ю.А. Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий с помощью электронного луча // Металлообработка. 2013. № 4. С. 44-49.
5. Афанасьева, Л.Е. Структурные фазовые превращения в быстрорежущей стали при лазерной закалке с оплавлением поверхности многоканальным CO₂ лазером // Л.Е. Афанасьева, И.А. Барабонова, Е.В. Ботянов, Г.В. Раткевич, Р.М. Гречишкин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 8(104). С. 10-13.
6. Белов, А.Ф. Строение и свойства авиационных материалов / А.Ф. Белов, Г.П. Бенедиктова, А.С. Висков [и др.]. М.: Металлургия, 1989. 368 с.
7. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. М.: «МИСИС». 2001. 416 с.
8. Pinkerton, A.J. An experimental and numerical study of the influence of diode laser beam shape on thin wall direct deposition / A.J. Pinkerton, L. Li // Journal of Laser Applications. 2005. V. 17. № 1. P. 47-56.
9. Biamino, S. Electron beam melting of Tie48Ale2Cre2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation / S. Biamino, A. Penna, U. Ackelid, S. Sabbadini, O. Tassa, P. Fino, M. Pavese, P. Gennaro, C. Badini // Intermetallics. 2011. V. 19. № 6. P. 776-781.
10. Murr, L.E. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting / L.E. Murr, S.M. Gaytan, A. Ceylan, E. Martinez, J.L. Martinez, D.H. Hernandez, B.I. Machado, D.A. Ramirez, F. Medina, S. Collins, R.B. Wicker // Acta Materialia. 2010. V. 58. P. 1887-1894.
11. International standard EN ISO 14577-1:2002. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.

УДК 621.791

А.М. Дожделев
Тверской государственной технической университет

ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

В статье кратко описаны основные виды быстрорежущих сталей и рассмотрены основные проблемы при изготовлении металлорежущего инструмента из такой стали.

Ключевые слова: металлорежущий инструмент, быстрорежущая сталь.

APPLICATION OF SPEED STEEL FOR MANUFACTURING METAL-CUTTING TOOLS

The article briefly describes the main types of high-speed steels and the main problems in the manufacture of cutting tools of a such steel.

Keywords: metal-cutting tools, high speed steel.

Развитие машиностроения осуществляется за счет комплексной механизации и автоматизации, использования прогрессивной технологии, направленной на сокращение числа рабочих мест. В целях постоянного ускорения и снижения затрат производства предусматривается развивать его в основном за счет использования станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, автоматических линий и т.п. Однако данное оборудование в комплексе с автоматическими системами управления от ЭВМ являются сложными и дорогостоящими. Поэтому необходимым условием его эффективного использования является высокая надежность работы всех элементов, в том числе и режущего инструмента. [1]

Металлорежущий инструмент является одним из важнейших орудий производства. Он используется при обработке резанием всевозможных деталей на металлорежущих станках. При этом срезается часть материала заготовки в виде стружки до получения требуемой поверхности детали [2–4]. Потребность в режущем инструменте колоссальна. По некоторым операциям обработки заготовки резанием стоимость инструмента составляет значительную часть стоимости операции [5].

Целью представленной работы является обоснование метода получения инструмента из быстрорежущей стали с применением наплавки.

В подавляющем большинстве случаев инструменты делают составными и сборными: их корпуса изготавливают из конструкционных сталей, а режущую часть – из инструментальных материалов, которые называют режущими материалами. Для обеспечения работоспособности металлорежущего инструмента материал его режущей части должен обладать высокой твердостью, теплостойкостью (красностойкостью), ударной вязкостью и циклической прочностью, термодинамической прочностью, теплоемко-

стью, теплопроводностью, малым сродством к обрабатываемому материалу, хорошо обрабатываться и не содержать дефицитных элементов.

Изготовление сборного или составного металлорежущего инструмента, в отличие от цельного, является экономически обоснованным шагом, так как стоимость инструментального материала зачастую крайне высока.

Инструментальная промышленность пока не имеет такого материала, который в полной мере отвечал бы всем перечисленным требованиям, но есть определенные группы материалов, отвечающих части из этих требований: инструментальные углеродистые и легированные стали, быстрорежущие стали, дисперсионно-твердеющие инструментальные сплавы, твердые сплавы, минералокерамика, естественные и искусственные твердые минералы (алмаз, рубин, сапфир, кубический нитрид бора). [6]

Применение быстрорежущих сталей дает возможность малым и средним предприятиям изготавливать собственный металлорежущий инструмент, в том числе и уникальный инструмент для специфических операций.

Мировой рынок инструментальных и быстрорежущих сталей стабильно растет. Ежегодно доля металлопродукции из этих марок стали увеличивается на 7–10%. [6]

Применяемые быстрорежущие стали делятся на три группы: быстрорежущие стали нормальной, повышенной и высокой производительности.

Стали нормальной производительности характеризуются пониженной теплостойкостью (615–620°C). Их применяют в основном при обработке цветных сплавов, чугунов, углеродистых и легированных сталей (I–VI групп) при скоростях резания до 35–40 м/мин.

Стали повышенной производительности дополнительно легированы кобальтом и ванадием. Повышенная теплостойкость данных сталей обеспечивает работу инструментов на повышенных режимах резания с увеличенной стойкостью.

Порошковые быстрорежущие стали выпускаются методом порошковой металлургии. Порошковые стали имеют карбидную неоднородность по 1–2-му баллу, характеризуются повышенной шлифуемостью и пластичностью при холодной и горячей деформации, обладают повышенной (на 500–700 МПа) прочностью при изгибе и в 1,5–2,5 раза более высокой стойкостью по сравнению с быстрорежущими сталями аналогичного состава обычного производства. Высокая прочность сталей при изгибе позволяет работать на повышенных подачах с сохранением заданных характеристик.

Стали высокой производительности характеризуются высокой теплостойкостью (700–725°C) и вторичной твердостью после закалки и отпуска. Инструменты из сталей высокой производительности имеют высокую стойкость при повышенных режимах резания жаропрочных и титановых сплавов. К быстрорежущим сталям высокой производительности относятся стали нового класса – карбидостали.

Карбидостали – это новый класс инструментальных материалов для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов, изготавливаемых методами порошковой металлургии. Это композиционный материал, в котором зерна тугоплавких карбидов (преимущественно TiC) равномерно распределены в связке из легированной стали. Карбидостали сочетают твердость и износостойкость твердых сплавов с прочностью и вязкостью легированных сталей и по своим характеристикам занимают промежуточное положение между быстрорежущими сталями и твердыми сплавами [7, 8].

Рассмотрим применение быстрорежущих сталей при изготовлении одного из наиболее простых и распространенных металлорежущих инструментов, которым является резец.

Конструкции сборного инструмента чаще всего сложные и имеют множество составных частей, что может отрицательно сказываться на точности и жесткости конструкции. Меры по устранению этих недостатков приводят к повышению стоимости такого вида инструмента. Именно поэтому сборный инструмент распространен в основном на массовом и серийном производстве, так при данной конструкции инструмента корпус служит длительное время, а затраты на инструмент, отнесенные к одной обработанной детали, меньше.

Конструкция же составного резца с быстрорежущей сталью имеет такие недостатки, как внутренние напряжения, возникающие при напайке из-за неодинаковой усадки материала корпуса и пластины в процессе остывания. Эти напряжения снижают износостойкость инструмента и приводят иногда к значительному браку по трещинам во время напайки, заточки и эксплуатации резцов. Однако составной резец имеет повышенную жесткость и виброустойчивость, что особенно важно при выполнении обдирочных и отделочных работ. Кроме того, инструмент малых размеров невозможно изготовить сборным.

Использование терmostойких клеев для приклеивания пластин значительно повышает работоспособность составных резцов. Остаточные напряжения, свойственные напайке, практически отсутствуют (обработка клеевого соединения производится при низких температурах, не превышающих $200^{\circ}C$), прослойка клея разрывает цепь термоЭДС, возникающую при резании, что способствует повышению износостойкости резцов с наклеенными пластинами. В результате стойкость резцов с наклеенными пластинами в 2–4 раза выше, чем с напаянными. [9]

Однако быстрорежущие составные резцы изготавливаются обычно не при помощи пайки, а при помощи наплавки или сварки [9]. Дополнительно повысить эксплуатационные свойства наплавленного металла возможно при использовании технологий наплавки и поверхностного пластического деформирования [10, 11]. Это не относится к быстрорежущим пластинам, полученным методами порошковой металлургии. Наплавка быстрорежущих сталей технологически проще осуществить на базе машино-

строительного мероприятия, чем изготовление порошковых пластин. Такой инструмент проще по конструкции, не требует специального и относительно дорогостоящего оборудования, неприхотлив в обслуживании и технологии заточки.

Однако при наплавке существует ряд проблем, которые до сих пор не удалось в полной мере преодолеть. Одной из таких проблем является выбор материала корпуса режущего инструмента. Материалом таких корпусов обычно является сталь, именуемая сталью для державок.

Для того чтобы противостоять высоким периодическим нагрузкам, которым подвержены некоторые типы корпусов режущих инструментов, например корпуса фрез, материал должен обладать хорошими механическими свойствами, включая высокую ударную вязкость, износостойкость и стабильность размеров.

В настоящее время в качестве материала для корпусов режущих инструментов применяют в основном низко- и среднелегированные конструкционные стали. Конструкция резца с составной пластиной предлагается в патенте [12]. Оптимальный выбор материала корпуса режущего инструмента крайне важен, особенно это касается составного инструмента, так как зона сплавления более твердого металла режущей части с конструкционной сталью всегда будет крайне опасной областью. Данная область будет склонна к растрескиванию и деформации из-за наличия зоны термического влияния (ЗТВ), а также из-за различий в свойствах двух металлов. Однако, хотя дефекты, вызванные разностью твердости и прочностю, все же можно преодолеть (повышение твердости путем термической обработки, выбор материала с оптимальной свариваемостью), проблема совершенствования свойств металла ЗТВ так и остается актуальной.

Следовательно, разработка метода качественного нанесения слоя наплавленной быстрорежущей стали на конструкционную сталь корпуса инструмента, который будет характеризоваться минимальными объемами металла, минимальными габаритами и максимально возможными технологическими свойствами изготавливаемого металлорежущего инструмента, является весьма перспективной. При этом необходимо попытаться избежать возникновения ЗТВ при наплавке или же максимально уменьшить ее размеры и степень влияния на свойства составного инструмента в целом. Это позволит наладить выпуск машиностроительными предприятиями собственного металлорежущего инструмента с заданным набором свойств и параметров для выполнения конкретных задач по минимальной цене, что крайне важно в условиях современной экономики.

Библиографический список

1. Баранчиков, В.И. Справочник конструктора-инструментальщика / В.И. Баранчиков, Г.В. Боровский, В.А. Гречишников. М.: Машиностроение, 1994. 560 с.
2. Родин, П.Р. Металлорежущие инструменты / П.Р. Родин. Киев: Вища школа, 1974, 400 с.

3. Фельдштейн, Е.Э. Режущий инструмент. Эксплуатация / Е.Э. Фельдштейн. Минск: Новое знание; М.: Инфра-М, 2012. 256 с.
4. Кожевников, Д.В. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирасов. М.: Машиностроение, 2007. 528 с.
5. Сахаров, Г.Н. Металлорежущие инструменты / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
6. Шагун, В.И. Режущий инструмент: Проектирование. Производство. Эксплуатация / В.И. Шагун. Мн.: НПО «ПИОН», 2002. 496 с.
7. Баранчиков, В.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина, А.И. Садыхов. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.
8. Рыжкин, А.А. Режущий инструмент / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, А.Г. Схиртладзе. Ростов н/Д.: Феникс, 2009. 405 с.
9. Косилова, А.Г. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х т. / А.Г. Косилова, Р.К. Мещеряков. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
10. Барчуков, Д.А. Совершенствование структуры быстрорежущих сталей наплавкой и поверхностным пластическим деформированием / Д.А. Барчуков, А.Ю. Лаврентьев, Н.С. Зубков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 141.
11. Лаврентьев, А.Ю. Упрочнение наплавленной быстрорежущей стали пластическим деформированием и термической обработкой / А.Ю. Лаврентьев, Д.А. Барчуков, Д.Н. Романенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 1. С. 94-100.
12. Патент RU № 2181644. Отрезной токарный резец / А.Ю. Лаврентьев, Н.С. Зубков; заявл. 29.02.2000, опубл. 27.04.2002. Бюл. № 23.

УДК 621.762

Р.М. Киреев, М.Ш. Мигранов

Уфимский государственный авиационный технический университет

СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ НИТРИДОВ И КАРБИДОВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА СИСТЕМ Ti-Al

Рассматриваются результаты исследований покрытий, формируемых с помощью вакуумной дуги с интегрально-холодным катодом. Обсуждаются результаты взаимодействия потоков титана и алюминия на холодных и горячих подложках в среде различных газов. Осажденные покрытия исследовались с помощью рентгеноструктурного и оптического методов исследования.

Ключевые слова: наноструктурные покрытия, катод, интерметаллид, карбид, нитрид.

SYNTHESIS OF NANOSTRUCTURED COATINGS OF NITRIDES AND CARBIDES INTERMETALLICS SYSTEMS Ti-Al

The results of studies of coatings formed by vacuum-arc with integrally cold cathode are presented. The results of the interaction of flows of titanium and aluminum on the hot and cold substrates in different gases are discussed. Deposited coatings were investigated by X-ray and optical methods.

Keywords: nanostructured coating, cathode, intermetallic compound, carbide, nitride.

Создание и совершенствование новой техники, работающей в условиях высоких и низких температур, агрессивных сред, невозможно без создания новых материалов и технологий их изготовления. Однако использование дефицитных и дорогих конструкционных материалов во всем объеме изделия не всегда является целесообразным. Экономически себя оправдывает использование материалов, поверхность которых обработана потоками заряженных частиц, обеспечивающих повышение твердости, износостойкости и коррозионной устойчивости к агрессивным средам. Одним из перспективных методов управления прочностными свойствами поверхностных слоев металлов и сплавов является нанесение различных покрытий вакуумными ионно-плазменными методами.

Интерметаллиды системы *Ti-Al* обладают целым рядом уникальных свойств: высокой температурой плавления, низкой плотностью, высоким модулем упругости, стойкостью к окислению и возгоранию, жаропрочностью. Область применения указанных соединений обширна и включает в себя компоненты двигателей, реактивные сопла, элементы обшивки космических аппаратов, сотовые конструкции сверхзвуковых летательных аппаратов и элементы их теплозащитных систем [1]. Существует еще одна область использования интерметаллидов: высокотемпературные штампы и формы, зажимные приспособления в высокотемпературных печах, роллеры для прокатки стальных слэбов, детали роторов гидротурбин, клапанов для автомобильных двигателей, режущий инструмент.

Основной объем интерметаллидных материалов систем *Al-(Ti, Co, Ni, Fe)*, а также их нитриды и карбиды в настоящее время формируют следующими методами:

1. Посредством спекания под давлением из порошковой смеси чистых элементов при высокой температуре. Интерметаллиды формируются на границах зерен порошков. Объемное содержание полученных интерметаллидов при спекании зависит от давления, температуры и процентного содержания элементов в зоне обработки [1]. Существенным недостатком является трудность обеспечения однородности состава по всему объему.

2. Интерметаллиды системы *Al-Ti* могут быть получены путем внедрения алюминия в титан при ионной имплантации с последующим отжигом. Интерметаллидное соединение формируется на глубине 100–200 нм при дозе $1,0 \cdot 10^{18} - 7 \cdot 10^{17}$ ион/см² и при температуре отжига 600–700°C [2–4]. Недостатком метода является малая толщина получаемых слоев и неоднородность химического состава интерметаллидных соединений по толщине слоя.

3. Для синтеза композиции *Al-Ti* используется принцип одновременного поатомного напыления слоев различных компонентов на охлаждаемую подложку в вакууме при давлении 0,1–5 Па [5]. Температура подложки не превышает 50°C. В качестве материалов подложек используются мо-

нокристаллический кремний и арсенид галлия, а также пластины из полированной нержавеющей стали и оптического стекла. Для получения интерметаллида *Ti-Al* требуется кратковременный локальный нагрев, после чего реакция становилась самоподдерживающейся с быстро распространяющимся фронтом, скорость которого составляет примерно 5 м/с.

Существующие методы получения интерметаллидов основаны на двух этапах: 1 этап – получение заготовки путем спекания порошков или нанесением послойного покрытия, состоящего из различных материалов; 2 этап – последующее термическое воздействие или легирование поверхности для синтеза интерметаллидов. Такие методы получения деталей из интерметаллидов требуют, во-первых, существенные материальные затраты на оборудование и обработку и, во-вторых, интерметаллиды трудно обрабатываются механически, что затрудняет изготовление деталей со сложнофасонной поверхностью.

В данной статье рассматривается метод получения интерметаллидов систем *Al-Ti*, а также их нитридов и карбидов непосредственно на поверхности детали посредством конденсации из плазменных потоков, генерируемых вакуумными дугами. Преимущество данного метода заключается в том, что возможно получать покрытия толщиной до 100 мкм однородным составом по всему объему и равномерным по всей поверхности детали независимо от ее конфигурации. Данный метод получения покрытий из интерметаллидов не требует последующей дополнительной термической обработки [6].

Формирование покрытий проводилось двумя ускорителями плазмы в среде различных реакционных газов. Были проведены исследования зависимости получения интерметаллидов от режимов обработки. Образцы были расположены в различных точках вакуумной камеры. В процессе проведения экспериментов контролировалось положение и расстояние образцов от катода, а также их пространственная ориентация относительно потока плазмы. Проводились исследования двух различных методов: одновременное осаждение из плазмы, генерируемой титановым и алюминиевым катодами, и послойное.

Исследовались режимы: ток дуги 40...120 А; давление $10^{-1} \dots 10^{-2}$ Па; время обработки 1...60 мин. Температура подложки варьировалась в диапазоне 40–300°C. Чтобы сохранять температуру подложки на более низком уровне, применялся радиационный метод охлаждения. Регулировались факторы: температура подложки, ток дуги, давление, скорость вращения образцов относительно собственных осей и осей рабочего стола, угол между осями плазменного потока и поверхности образцов. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре общего назначения *Shimadzu XRD 6000*.

На первом этапе определялась зависимость распределения скорости прироста материала в различных точках рабочей камеры от режимов обработки. Данные зависимости определялись как для титана, так и для алюминия, при этом поверхность образцов располагалась под различными углами к оси потока плазмы.

Проведенный анализ результатов позволил определить распределение процентного содержания ионов в плазме по объему вакуумной камеры.

При последовательном (послойном) нанесении Ti и Al на подложке образовывалось покрытие, состоящее из чередующихся слоев Ti и Al . Образование интерметаллидов также не обнаружено. В связи с этим было принято решение продолжить исследования при асимметричном расположении образцов относительно дуговых испарителей. При этом исследовались как различные режимы обработки, так и различное пространственное расположение подложки относительно электродуговых испарителей.

Анализ результатов фазового состава покрытий на образцах показал, что на процентное содержание интерметаллида, а также их карбидов и нитридов в покрытии влияет:

- пространственное расположение образцов (расстояние до электродуговых испарителей, угол между осью плазменного потока и поверхностью подложки);
- дополнительная бомбардировка поверхности подложки ионами реакционного газа;
- режимы обработки (соотношение тока дуги Ti и Al испарителей соответственно, давление, энергии ионов).

Анализ процентного содержания интерметаллидов $Ti-Al$ в покрытии показал, что увеличение концентрации ионов алюминия в плазме приводит к повышению процентного содержания интерметаллида в покрытии. Дополнительная бомбардировка ионами инертного газа также приводит к повышению процентного содержания интерметаллида в покрытии.

Установлено, что фазовый состав покрытия из карбидов и нитридов интерметаллида $Ti-Al$ зависит от энергии ионов. Увеличение энергии ионов приводит к образованию высших нитридов и карбидов $TiAl$, а уменьшение – к образованию низших нитридов и карбидов $TiAl$.

Выводы. Одновременное и последовательное (послойное) нанесение Ti и Al на центрально расположенную подложку не позволяет синтезировать покрытия из интерметаллидов.

При одновременном нанесении Ti и Al на ассимитрично расположенную подложку, как с ассистированием так и без, на образцах синтезируются интерметаллиды, а также их нитриды и карбиды.

На фазовый состав покрытия из карбидов и нитридов интерметаллида $Ti-Al$ влияют: процентное содержание ионов Ti , Al и реакционного газа в плазме, угол между осями плазменных потоков и поверхностью подложки, температура подложки.

Повышение энергии ионов приводит к увеличению процентного содержания высших нитридов и карбидов *Ti-Al* в покрытии.

Библиографический список

1. Федоричева, М.В. Структура интерметаллического NiAl, синтезированного под давлением / М.В. Федоричева [и др.]. Физика и химия обработки материалов. 1999. № 5. С. 61-70.
2. Цыганов, И.А. Формирование фаз TiAl при имплантации алюминия в титан / И.А. Цыганов [и др.]. Материалы 5-й конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками. Томск, 2000. С. 341-345.
3. Bhattacharya, P. FeAl multilayers by sputtering: heat treatment and the phase evolution / P. Bhattacharya, K.H. Ishibara, K. Chattopadhyay. Materials Science and Engineering. 2001. V. 304-306. P. 250-254.
4. Sampath, S. Splat formation and microstructure development during plasma spraying: deposition temperature effects / S. Sampath, X. Jiang. Materials Science and Engineering. 2001. V. 304-306. P. 144-150.
5. Анциферов, В.Н. / В.Н. Анциферов, С.П. Косоголов. Физика и химия обработки материалов. 1996. № 6.
6. Будилов, В.В. Интерметаллические продукты, образующиеся при совместном использовании с холодным катодом вакуумной дуги для распыления титана и алюминия / В.В. Будилов, Р.М. Киреев, З.И. Камалова. Материаловедение и инженерия. 2004. Т. 375-377. С. 656-660.

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

УДК 621.313.13

А.П. Архаров, К.С. Любимов
Тверской государственной технической университет

**ИЗМЕРЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЛОСКОСТЕЙ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА
НАРУЖНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Описан способ измерения отклонения взаимного расположения плоскостей и наружной сферы. В предлагаемом способе по сравнению с известными обеспечивается измерение двух параметров расположения: расстояния от плоскостей до центра сферы и симметричность плоскостей относительно упомянутого центра. Способ может быть использован на машиностроительных предприятиях при измерении деталей, содержащих требования к взаимному расположению конструктивных элементов в виде плоскостей и сферы.

Ключевые слова: измерение, плоскость, сфера, деталь.

**MEASUREMENT OF THE PLANE ORIENTATION DEVIATIONS
FROM THE CENTER OF THE OUTER SPHERICAL SURFACE**

The method of the measurement of the planes deviations relative to outer sphere is described. As compared with common methods the proposed one provides the measurement of the two orientation parameters: dimension from the planes to the sphere center as well as their rotational symmetry. The above method may be used in machine works for the measurement of machine-parts with plane-and-sphere relative position restriction.

Keywords: measurement, plane, sphere, part.

В конструкциях некоторых деталей машиностроения имеются элементы в виде сферы и плоскостей. К их взаимному расположению предъявляются точностные требования, измерения которых вызывает затруднения.

Для измерения отклонения расположения поверхностей известен способ [1], который имеет ограниченные технологические возможности, поскольку позволяет измерять только отклонения от симметричности пазов и только относительно оси цилиндрической поверхности. Известен способ измерения отклонений расстояния между перекрещивающимися осями наружной и внутренней цилиндрических поверхностей [2]. Однако этим способом невозможно измерение параметров расположения плоскостей относительно центра сферической поверхности: расстояния и отклонения от симметричности.

Отмеченных недостатков лишен способ для измерения отклонений взаимного расположения плоскостей и наружной сферы [3].

Способ, схема которого представлена на рисунке, реализуется следующим образом.

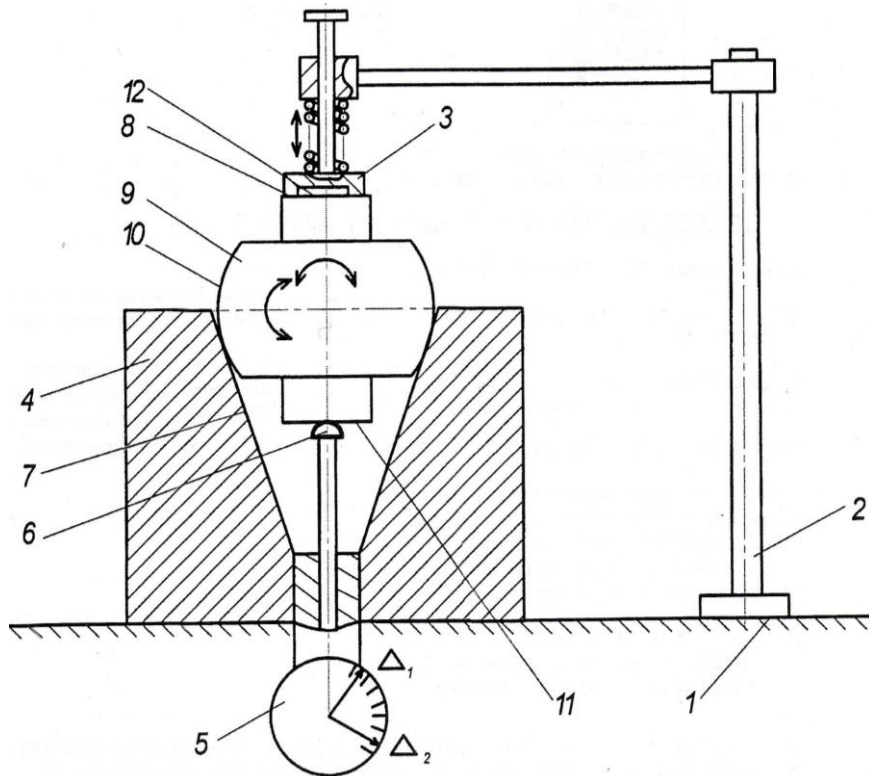


Схема осуществления способа

На установочной плоскости 1 размещают стойку 2, устанавливают прижим 3 на стойке 2, на базирующем элементе 4 – отсчетное устройство 5, обеспечивая заданный вылет его измерительному щупу 6 в коническом отверстии 7 базирующего элемента 4. Размещают базирующий элемент 4 на установочной плоскости 1 в положение, при котором ось конического отверстия перпендикулярна рабочей поверхности 8 прижима 3, устанавливают объект измерения 9 сферической поверхностью 10 в коническое отверстие 7, обеспечивая контакт первой измеряемой плоскости 11 объекта измерения 9 с измерительным щупом 6. Подводят прижим 3 к объекту измерения 9 и одновременно вращают последний в коническом отверстии 7. При этих совместных движениях добиваются прилегания рабочей поверхности 8 прижима 3 ко второй измеряемой плоскости 12. Снимают первое показание Δ_1 отсчетного устройства 5, отводят прижим 3. Затем переустанавливают объект измерения 9 в коническом отверстии 7 таким образом, чтобы обеспечить контакт второй измеряемой плоскости 12 с измерительным щупом 6. Повторяют подвод прижима 3 с вращением объекта измерения 9 в коническом отверстии 7 для обеспечения прилегания рабочей поверхности 8 прижима 3 к первой измеряемой плоскости 11, снимают второе показание Δ_2 отсчетного устройства 5. Определяют отклонения от настроенного значения расстояния от измеряемых плоскостей 11 и 12 до центра сферической поверхности 10 по показаниям Δ_1 и Δ_2 отсчетного устройства 5, а по их полуразности – отклонение от симметричности плоскостей относительно упомянутого центра.

Таким образом обеспечивается измерение двух параметров расположения плоскостей относительно центра сферы.

За счет иных условий выполнения известных в [2] операций над объектом измерения и с помощью измерительного устройства, дополнительных операций и порядка их выполнения в предлагаемом способе обеспечивается измерение двух параметров расположения плоскостей относительно центра наружной сферической поверхности.

Способ может быть использован на машиностроительных предприятиях при измерении деталей, содержащих требования к взаимному расположению конструктивных элементов в виде плоскостей и сфер.

Библиографический список

1. А. С. № 800600. Способ контроля симметричности шпоночного паза вала / Б.Г. Фридлянд; опубл. 30.01.81. Бюл. № 4.
2. Патент RU № 2125707. Способ измерения отклонений расстояния между перекрещивающимися осями наружной и внутренней цилиндрических поверхностей / А.П. Архаров; заявл. 12.02.1997; опубл. 27.01.1999. Бюл. № 3.
3. Патент RU № 2456539. Способ измерения отклонений расположения плоскостей относительно центра наружной сферической поверхности / А.П. Архаров, К.С. Любимов; заявл. 10.02.2011; опубл. 20.07.2012. Бюл. № 20.

УДК 621.928.26

В.А. Русинкевич, А.В. Кондратьев, С.М. Кочканян, А.И. Перхуров
Тверской государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО И ПРОДОЛЬНОГО УГЛОВ НАКЛОНА ВАЛКОВОЙ ЖЕЛОБООБРАЗНОЙ СОРТИРОВКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ВРЕМЯ ГРОХОЧЕНИЯ ГРАВИЯ

Приведены результаты исследований процесса грохочения гравия на валковой сортировке. Установлено влияние поперечного и продольного углов наклона валковой желобообразной сортировки на эффективность и время грохочения гравия.

Ключевые слова: валковая сортировка, шнек, грохочение гравия.

DETERMINATION OF THE EFFECT OF TRANSVERSE AND LONGITUDINAL INCLINATION ANGLES OF THE GROOVED ROLLER SORTING MACHINE ON THE EFFICIENCY AND DURATION OF GRAVEL SIZING

The paper presents the results of the research of the process of gravel sizing by the grooved roller sorting machine. The influence of transverse and longitudinal inclination angles of the grooved roller sorting machine on the efficiency and duration of gravel sizing process was revealed.

Keywords: roller sorting machine, screw, gravel sizing.

Для анализа эффективности и длительности протекания грохочения гравия на валковой сортировке был проведен ряд экспериментальных исследований на лабораторном стенде желобообразной установки со шнеко-

вым интенсификатором. Исследования проводились с целью совершенствования процесса грохочения каменных материалов путем определения оптимальных численных значений поперечного (α) и продольного (γ) углов наклона рабочей поверхности желоба.

Схема экспериментального оборудования для грохочения сыпучих материалов представлена на рис. 1 [1]. Устройство состоит из рамы 1, на которой закреплены продольные валы 2 с многогранными дисками 3, образующие желобообразную просеивающую поверхность. У верхнего и нижнего валов 2 на раме 1 установлены неподвижные кожухи 4, нижняя часть которых выполнена в виде гребенки, входящей в промежутки между дисками 3. Над валами 2 с дисками 3 на раме 1 вдоль желоба установлен шнек 5 с эластичными (резиновыми) лопастями. Со стороны поступления разделяемого материала установлен загрузочный лоток 6. В конце желоба на раме 1 между валами 2 выполнено разгрузочное окно для выгрузки крупной фракции материала (промежутки между валами 2).

Устройство работает следующим образом. Сортируемый материал с загрузочного лотка 6 поступает в желоб на продольные вращающиеся валы 2 с дисками 3. Многогранные диски 3, вращаясь, постоянно подбрасывают куски материала и перемещают их по направлению вращения дисков к верхним валам 2 желоба. При этом шнек 5, вращающийся в противоположном направлении относительно вращения валов 2, своей эластичной навивкой подхватывает куски материала в момент их подскока и транспортирует их вдоль желоба, одновременно направляя их к верхним валам 2 с дисками 3. Таким образом, происходит интенсивное перемешивание материала и его распределение по поверхности желоба. Выполнение навивки шнека из эластичного материала (резиновая транспортерная лента) позволяет избежать заклинивания в случае попадания кусков материала между дисками 3 и навивкой за счет упругой деформации последней. При движении материала вдоль осей 2 зерна материала, размер которых меньше, чем расстояние между дисками 3, проваливались в промежутки между дисками и попадали в соответствующие бункеры, расположенные под валами 2. Частицы материала, размер которых превышал расстояние между дисками 3 в конце желоба по ходу движения материала, выгружались между валами в корб.

Характеристика стенда и условия проведения опытов: форма дисков – восьмигранная; диаметр дисков – 340 мм; толщина дисков – 8 мм; промежуток между соседними дисками вала – 30 мм; количество валов – 5; длина валов – 600 мм; расстояние между осями соседних валов – 240 мм; диаметр шнекового интенсификатора – 920 мм; шаг навивки шнека – 230 мм. Ширина просеивающей поверхности в горизонтальной проекции – 900 мм. Под просеивающей поверхностью размещались контейнеры для сбора каменного материала. В качестве классифицируемого материала использова-

ласть гравийная смесь, средний размер которой составлял от 5 до 40 мм. Соотношение фракций нижнего и верхнего классов – 60/40. Подача материала – 180 кг/мин.

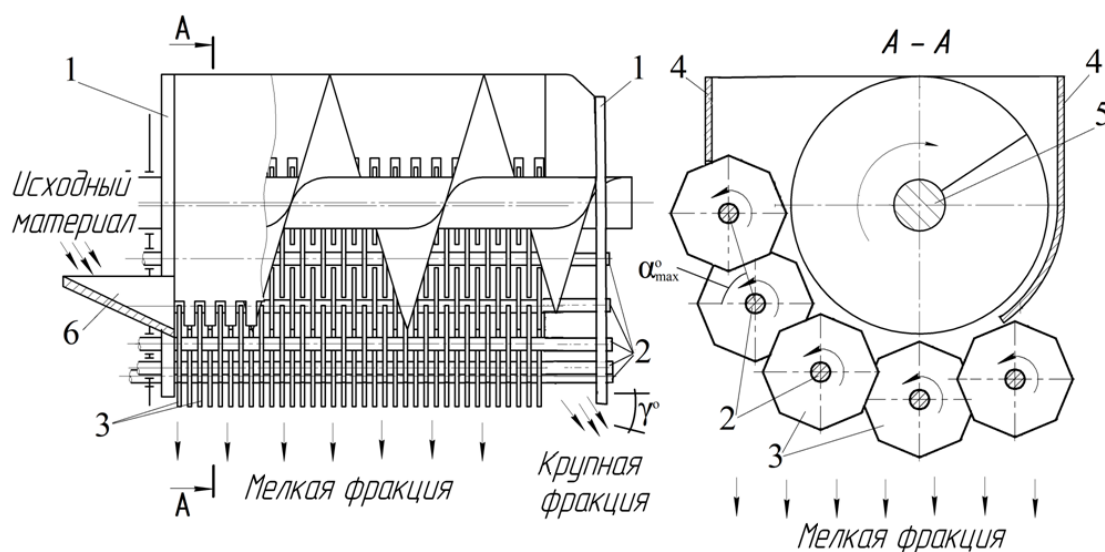


Рис. 1. Схема валкового грохота с интенсификатором

После завершения процесса грохочения нижняя и верхняя фракции материала взвешивались. Исследования производились с трехкратной повторностью.

На основе предварительных исследований была определена зависимость скорости транспортирования материала от частоты вращения шнека $n_{\text{шн}}$ (табл.) при $\alpha_{\text{max}} = 65^\circ$ и $\gamma = 0^\circ$ [2], где α_{max} – наибольшая крутизна поверхности желоба.

Изменение скорости транспортирования камней

Частота вращения шнека, об/мин	19,95	26,6	33,25	39,9	46,55
Скорость транспортирования, м/с	0,049	0,058	0,067	0,084	0,086

Из представленных данных видно, что с увеличением частоты вращения шнека от 19,95 до 46,55 об/мин происходит значительное увеличение скорости транспортирования материала – почти в два раза (см. табл.). Дальнейшее увеличение частоты вращения шнека приводило к несущественному повышению скорости транспортирования материала. Поэтому последующие исследования проводились при $n_{\text{шн}} = 41$ об/мин.

Сначала исследовали влияние изменения наибольшей крутизны поверхности желоба в интервале численных значений угла α_{max} от 55° до 70° при $\gamma = 0^\circ$. Результаты опытов представлены на рис. 2.

Полученные графические зависимости аппроксимируются в виде уравнений:

$$E = -0,0105\alpha^2 + 0,0775\alpha + 98,663 \quad \text{при } \eta = 0,99;$$

$$t = -0,1183\alpha + 10,074 \quad \text{при } r = 0,92,$$

где η – корреляционное отношение; r – коэффициент корреляции.

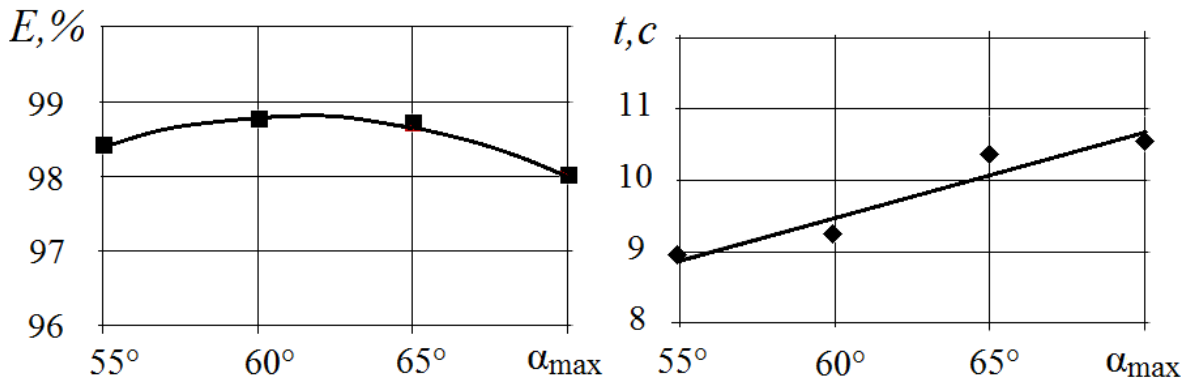


Рис. 2. Влияние поперечного угла наклона α_{max} на эффективность и длительность процесса сепарирования: ■ – эффективность грохочения E ; ◆ – время грохочения t

Проведенный эксперимент показал высокую эффективность процесса грохочения более 98,7% при поперечном наклоне установки α_{max} в диапазоне от 60° до 65°. Время протекания процесса снизилось от 10,07 с при $\alpha_{max} = 65^\circ$ до 9,25 с при $\alpha_{max} = 60^\circ$, т.е. на 8,14%. Однако, принимая во внимание наибольшие показатели эффективности грохочения, $\alpha_{max} = 60...65^\circ$ следует считать наиболее предпочтительным.

Затем изменяли продольный угол наклона γ рабочей поверхности на спуск, т.е. угол изменялся от 0° до -7°. При этом наибольшая крутизна желоба (угол установки верхнего вала по отношению к предыдущему) составляла $\alpha_{max} = 65^\circ$. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

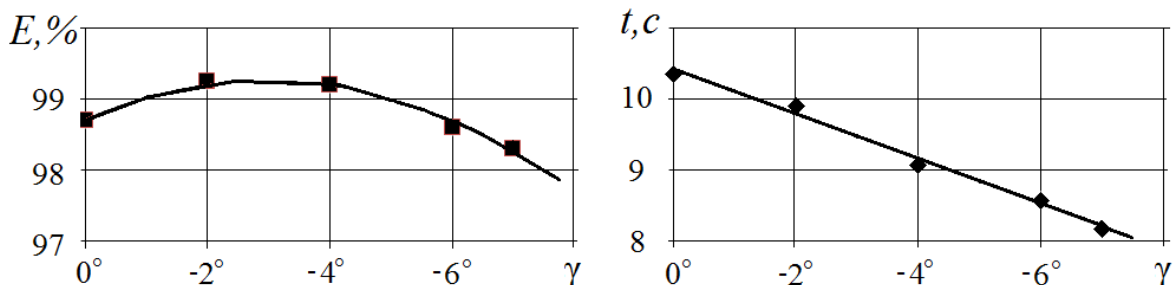


Рис. 3. Влияние продольного угла наклона γ на эффективность и длительность процесса сепарирования: ■ – эффективность грохочения E ; ◆ – время грохочения t

Полученные графические зависимости аппроксимируются в виде уравнений:

$$E = -0,0621\gamma^2 + 0,3667\gamma + 98,722 \quad \text{при } \eta = 0,9807;$$

$$t = -0,3158\gamma + 10,417 \quad \text{при } \tau = 0,9921.$$

Полученные данные позволяют отметить высокую эффективность процесса грохочения – более 99% в диапазоне от -2° до -4°. Время протекания процесса при этом снижается от 10,42 с при $\gamma = 0^\circ$ до 9,15 с при $\gamma = -4^\circ$, т.е. на 12,2%. Изменение продольного угла наклона менее -4°, когда наклон на спуск просеивающей поверхности в сторону движения матери-

ла увеличивается, уменьшает время процесса грохочения, но приводит к наклону просеивающих ячеек грохота. Это, в свою очередь, приводит к дополнительным сопротивлениям трения проходящего материала между дисками об их боковые поверхности, что и вызывает снижение эффективности разделения. Поэтому для достижения максимальной эффективности грохочения и снижения времени процесса диапазон углов γ от -2 до -4° является наиболее предпочтительным.

Итак, результаты исследований показали, что эффективность грохочения существенно зависит от величин поперечного и продольного углов желобообразной поверхности валковой сортировки. Значения поперечного угла $\alpha_{max} = 60...65^\circ$ и продольного угла $\gamma = -2...-4^\circ$ следует считать оптимальными, поскольку они обеспечивают высокие показатели эффективности грохочения гравия – более 99%.

Библиографический список

1. Патент RU № 126633. Устройство для грохочения сыпучих материалов / А.В. Кондратьев, С.М. Кочканын, В.А. Русинкевич, Т.И. Ренкус; 2013. Бюл. № 10.
2. Кондратьев, А.В. Изучение процесса грохочения гравия на желобообразной валковой сортировке // А.В. Кондратьев, С.М. Кочканын, Н.Е. Воробьев, А.И. Перхуров, В.А. Русинкевич. Механизация строительства. Изд-во «Креативная экономика», 2013. № 1. С. 20-23.

УДК 621.928.26

А.В. Кондратьев, С.М. Кочканын, В.А. Русинкевич, А.К. Абдуллах
Тверской государственный технический университет

ПРОСЕИВАЕМОСТЬ ГРАВИЯ ПО ДЛИНЕ СОРТИРОВКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА СМЕСИ

Приведены результаты сравнительных исследований процесса грохочения гравия на валковой сортировке с подвижными фартуками и без них. Установлено влияние фракционного состава смеси на интенсивность просеивания гравия по длине валковой сортировки.

Ключевые слова: валковая сортировка, подвижные фартуки, просеиваемость гравия.

GRAVEL SIFTING INTENSITY ALONG THE LENGTH OF GRADING MACHINE DEPENDING ON THE COMPOSITION FRACTION

The paper presents the results of comparative studies of the gravel sifting process on roller sorting machine with movable apron and without it. The effect of the fractional composition of the mixture on the intensity of gravel sifting along the length of the roller sorting machine was found.

Keywords: roller sorting machine, movable aprons, gravel sifting.

Исследования проводились с целью установления действия подвижных фартуков на интенсивность просеивания каменных материалов по длине сита при изменении фракционного состава гравийной смеси.

Для получения опытных данных использовался экспериментальный стенд валковой сортировки, схема которого представлена на рис. 1 [1, 2].

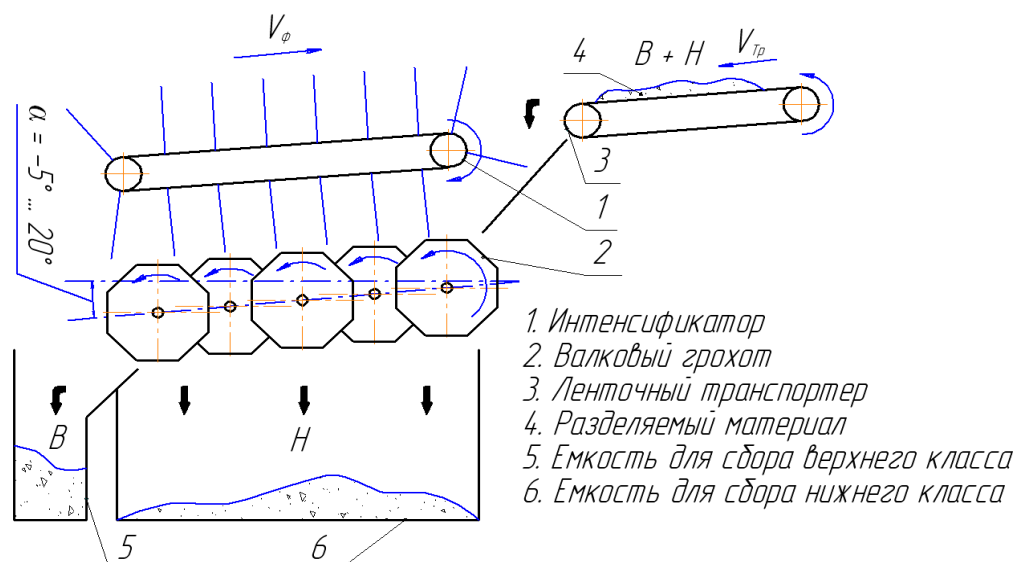


Рис. 1. Схема валковой сортировки с подвижными фартуками

Условия проведения экспериментов: угол наклона грохота к горизонту $\alpha = 5^\circ$; частота вращения валов $n = 60$ об/мин; скорость фартуков $v = 0,32$ м/с; наименьшее расстояние между рядом стоящими дисками (просеиваемый промежуток) 20 мм. В ходе эксперимента фракционный состав смеси (отношение частиц верхнего класса к частицам нижнего класса (В/Н)) изменялся в пределах: 40/60, 30/70, 20/80. Фракционный состав нижнего класса Q представлен в таблице. Для определения количественного показателя просеиваемости материала по длине сита под валами стенда были установлены накопительные отсеки, собирающие просеянный материал по длине грохота.

Фракционный состав сортируемого гравия

Размер частиц, мм	5–10	10–15	15–20
Содержание в смеси, %	21	25	54

Как показали исследования на свободной поверхности сита без подвижных фартуков, фракционный состав практически не оказывает влияние на просеиваемость гравия по длине сортировки (рис. 2).

На рис. 3 показаны результаты просеивания гравия на сортировке с подвижными фартуками. Сравнивая результаты просеивания гравия на сортировке с фартуками (рис. 3) и без фартуков (рис. 2), следует отметить заметное возрастание выделения мелких частиц по длине сита, оснащенного интенсификатором. Так, например, если на сортировке без фартуков на

первом участке (150 мм) просеивалось всего 8% частиц нижнего класса, то на устройстве с фартуками просеиваемость достигала 20...27%. При этом зона наиболее интенсивного просеивания материала (60...65%) на сортировке с фартуками соответствовала участку 300...450 мм, а на грохоте без фартуков – 450...600 мм. Таким образом, можно заключить, что с установкой подвижных фартуков на валковой сортировке длина наиболее эффективного грохочения гравия сократилась в среднем на 30%.

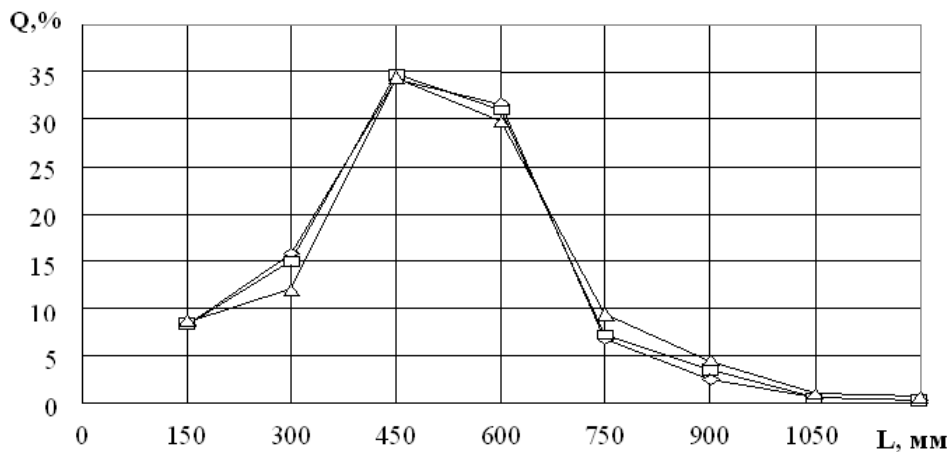


Рис. 2. Просеивание гравия по длине грохота при соотношении верхнего класса к нижнему в %: \diamond – 40:60; \square – 30:70; Δ – 20:80 (сортировка без фартуков)

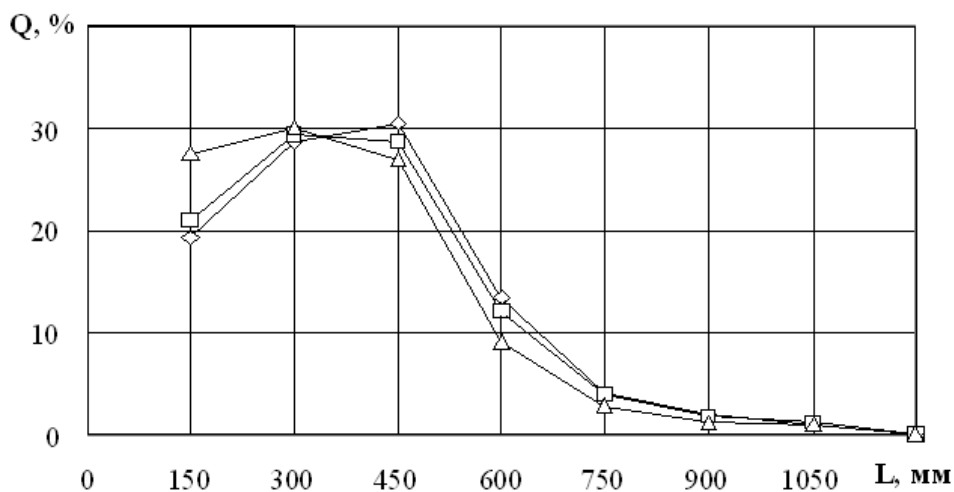


Рис. 3. Просеиваемость гравия по длине сита для материала с фракционным составом В/Н: \diamond – 40:60%; \square – 30:70%; Δ – 20:80% (сортировка с подвижными фартуками)

Известно, что увеличение содержания в нижнем классе частиц, размер которых в два раза меньше рабочего промежутка, также оказывает влияние на результативность просеивания мелких частиц на грохотах [3]. Результаты исследований на валковой сортировке без фартуков приведены на рис. 4. Наиболее активно процесс разделения идет на расстоянии 450...600 мм от начала просеивающей поверхности. Низкая просеивающая способность на участке до 450 мм объясняется давлением потока поступающего материала на сепарирующую поверхность, что препятствует активной сегрегации частиц гравия. В целом же благодаря активной поверхно-

сти валкового грохота содержание в нижнем классе частиц, размер которых в два раза меньше просеивающего промежутка между дисками, существенного влияния на интенсивность просеивания материала не оказывает. Это, в свою очередь, еще раз подтверждает преимущество валковых сортировок по сравнению с другими типами устройств.

Затем аналогичные испытания были проведены на разделительном устройстве с подвижными фартуками (рис. 5). При этом процентное содержание в нижнем классе частиц размером в два раза меньше отверстия в сите составляло от 10 до 80%.

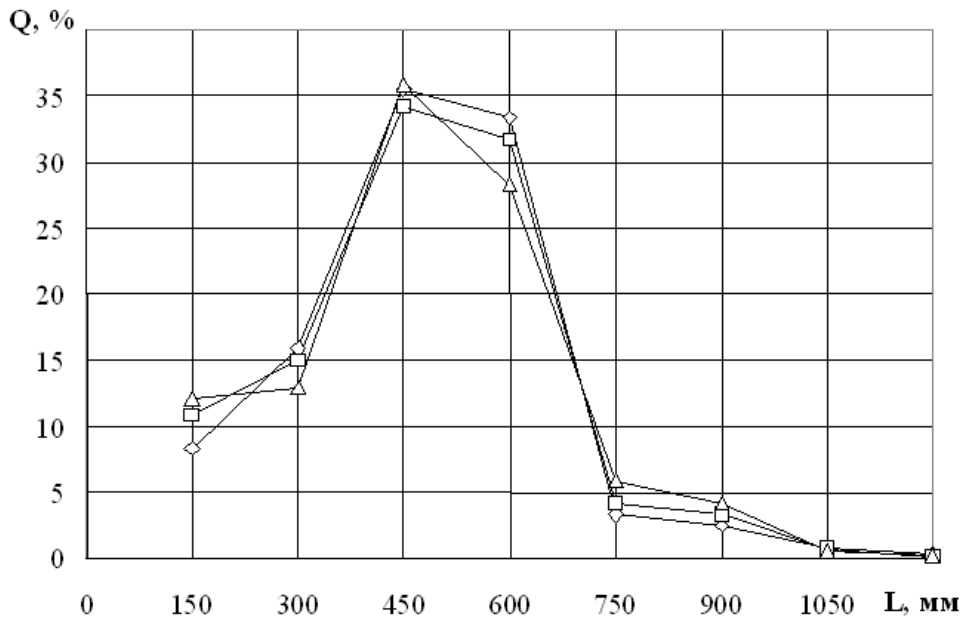


Рис. 4. Интенсивность просеивания по длине грохота в зависимости от количества в нижнем классе частиц, в два раза меньших просеивающего промежутка:
 Δ – 40%; \square – 30%; \diamond – 10% (сортировка без фартуков)

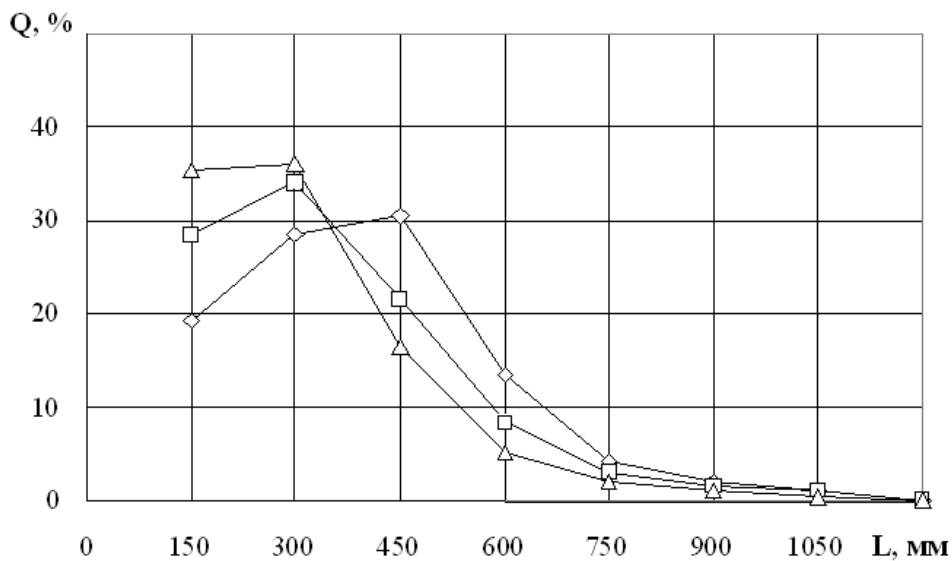


Рис. 5. Интенсивность просеивания по длине грохота в зависимости от количества в нижнем классе частиц, в два раза меньших просеивающего промежутка:
 \diamond – 10%; \square – 50%; Δ – 80% (сортировка с подвижными фартуками)

Опытные данные также показывают, что 80...85% мелких частиц просеивается на длине сита – 450 мм (см. рис. 5). При этом на первом участке (150 мм) интенсивность тем выше, чем больше в исходном материале зерен, размер которых в два раза меньше отверстия в сите. В противоположность этому на сортировке без фартуков на участке 450 мм просеивается только 60% частиц нижнего класса (см. рис. 4), т.е. на 20...25% меньше.

Выполненные исследования показали, что установка подвижных фартуков на валковой сортировке позволяет ускорить классификацию гравия за счет интенсификации процесса разделения материала. Это, несомненно, подтверждает правильность направления совершенствования процесса грохочения нерудных материалов на валковых устройствах.

Библиографический список

1. Кондратьев, А.В. Создание высокоэффективных валковых сепараторов торфяных машин и оборудования: автореф. дис. ... докт. техн. наук / А.В. Кондратьев. Тверь, 1998. 34 с.

2. Кондратьев, А.В. Совершенствование процесса грохочения каменных материалов на валковой сортировке / А.В. Кондратьев, С.М. Кочканян, В.А. Русинкевич, А.К. Абдуллах // Горный информационно-аналитический бюллетень: научно-технический журнал. Изд-во «Горная книга», 2011. № 11. С. 179-183.

3. Хархута, Н.Я. Дорожные машины: учеб. для вузов / Н.Я. Хархута, М.И. Капустин, В.П. Семенов, И.М. Эвентов. Л.: Машиностроение, 1968. 416 с.

УДК 621.9.06:529.075

В.В. Смирнов

Тверской государственной технической университет

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫМИ СТАНКАМИ В УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье изложены результаты исследований возможности построения системы управления специальными станками в условиях машиностроительного производства на основе программируемого логического контроллера.

Ключевые слова: автоматизированное управление технологическим оборудованием, программируемый контроллер, логическое программирование.

AUTOMATION OF SPECIAL MACHINES CONTROL IN THE ENGINEERING

The article presents the results of investigations of the possibility of building of a special machine control system based on programmable logic controller in engineering.

Keywords: automated control of technological equipment, programmable controller, logic programming.

Использование специального технологического оборудования в условиях массового и крупносерийного машиностроительного производства позволяет повысить:

- технологическую надежность процесса обработки детали;
- производительность работы при использовании параллельно работающих многоинструментных наладок;
- фондоотдачу, так как специальное оборудование создано под конкретную конструкцию детали с учетом ее особенностей, а типовое оборудование ориентировано на обработку деталей со среднестатистическими параметрами.

Для управления рабочими органами специальных станков широко применяют путевые системы управления, в которых используют упоры, кулачки, а также датчики пути или положения, которые являются задающими органами. Путевая система управления удобна тем, что она одновременно с обеспечением управления контролирует выполнение команд. Это означает, что если команда по каким-то причинам не выполнится или задержится ее выполнение, то рабочий орган не займет новую позицию и не обеспечит выдачу последующей несовместимой команды. Эту систему легко переналадить перестановкой упоров или кулачков [1].

Система управления таким станком является дискретным устройством, которое на функционально-логическом уровне представляет собой дискретный автомат. При его разработке используют дискретизацию сигналов, причем базовым является двухзначное представление сигналов. Эти сигналы удобно рассматривать как булевы величины, а для моделирования системы можно использовать аппарат математической логики. Математические модели устройства управления представляют собой систему математических моделей элементов, входящих в устройство, при отождествлении сигналов, относящихся к одному и тому же соединению элементов. Эта модель относится к синхронному типу, так как в ней отсутствует такая переменная, как время. Синхронные модели используют для анализа установившихся состояний [2].

Таким образом, построение алгоритма работы системы управления станка не представляет собой задачу высокой сложности, и основные проблемы заключаются в реализации этого алгоритма с помощью дискретных элементов. В настоящее время многие системы управления реализованы на основе логических электромеханических реле. Такие системы управления имеют большие габаритные размеры, высокое энергопотребление и относительно низкую надежность. При этом эти устройства относительно дороги в производстве, так как их монтаж должен осуществляться высококвалифицированными специалистами.

В настоящее время задачу разработки системы управления цикловой машины можно решить с помощью программируемого логического контроллера, имеющего интегрированный дисплей и клавиатуру, программируемую логику, библиотеку встроенных функций, входы и выходы. Таким образом, процесс сборки электромеханических или электронных элементов, реализующих заданный алгоритм, заменяется процессом программирования логики работы контроллера. Процесс программирования сводится

к извлечению из библиотек требуемых в данный момент функций, определению соединений входов и выходов данной функции с входами и выходами логического модуля или других функций, а также установке параметров настройки данной функции (например, времени задержки включения или отключения, параметров предварительной установки и граничных значений счета, граничных значений аналоговых величин и т.д.). Во время программирования на экране дисплея модуля отображается только одна из всех используемых в программе функций. Готовая программа может быть переписана в модуль памяти. Все операции программирования поддерживаются встроенной системой меню модуля.

Для упрощения процесса программирования контроллера, а также для виртуальной диагностики разработанной программы может быть использовано специальное программное обеспечение, например пакет *LOGO! Soft Comfort*, разработанный фирмой *Siemens*. Этот пакет предоставляет наиболее широкие возможности по разработке, отладке и документированию программ логических модулей *LOGO!*. Разработка программы может выполняться на языках *LAD (Ladder Diagram)* или *FBD*. Допускается использование символьных имен для переменных и функций, а также необходимых комментариев. В отличие от программирования с клавиатуры обеспечивается наглядное представление всей программы, поддерживается множество сервисных функций, повышающих удобство разработки и редактирования программы. Разработка, отладка и полное тестирование работы программы может осуществляться в автономном режиме без наличия реального модуля *LOGO!*. Готовая программа может загружаться в логический модуль или записываться в модуль памяти, а также сохраняться на жестком диске компьютера.

Библиографический список

1. Головенков, С.Н. Основы автоматики и автоматического регулирования станков с программным управлением / С.Н. Головенков, С.В. Сироткин. М.: Машиностроение, 1980. 142 с.
2. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с.

УДК 53.097:536.5

А.С. Енин, К.Б. Корнеев, Т.И. Узикова
Тверской государственный технический университет

СПЕЦИФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Тепловизионная диагностика электроконтактных соединений позволяет предотвратить выход оборудования из строя на ранних стадиях. Особенности тепловизионного метода должны учитывать специфику тепловой картины в объеме материала контакта, условия проведения измерений, характер и способ обработки поверхностей.

Ключевые слова: электрические контакты, термограмма, электрические сети.

SPECIFIC ASPECTS OF THERMAL IMAGING CONTROL OF ELECTRIC POWER CONNECTIONS

Thermal imaging diagnostics of electric power connections enables to prevent power equipment damage at early stages. Features of thermal imaging method should take into account the specificity of thermal picture in the contact interior, the measurement conditions, the quality and the manner of surface treatment.

Keywords: electrical contacts, thermogram, electrical networks.

Высокая изношенность основных фондов предприятий энергетического сектора (по разным оценкам для Тверской области эта величина составляет от 60 до 85%), а также электрической части промышленных предприятий ведет к необходимости проведения планово-предупредительных мероприятий по недопущению наступления аварийных случаев в электрических сетях. Так как большинство дефектов можно выявить только в режимах эксплуатации электрооборудования при номинальных нагрузках, то наиболее перспективными являются методы косвенного контроля показателей, допускающие снятие характеристик элементов без вмешательства в режим работы.

Условия эксплуатации в большой степени влияют на надежность работы электрооборудования. По этой причине даже в пределах одного филиала ОАО «Холдинг МРСК» (новое наименование – ОАО «Россети») структура отказов электрооборудования может сильно отличаться. Последние годы значительно возросло количество отказов, вызванных природными факторами [1], однако на протяжении последних 15 лет уровень отказов электрооборудования подстанций, вызванных выходом электрических аппаратов из строя по техническим причинам, в абсолютном выражении остается неизменным. В структуре отказов, вызванных техническими причинами, около 9,5% отказов приходится на различного рода повреждения в ошиновке и шлейфах и порядка 15,3% – на повреждения на вводах напряжением 6–110 кВ. Большинство аварийных явлений в данных элементах вызвано ухудшением свойств электроконтактных соединений различного типа: втычных, болтовых. Для их диагностики наиболее рационально применять неразрушающий контроль при помощи тепловизионных приборов, позволяющих провести мониторинг теплоотдачи от контактного соединения, проконтролировать соблюдение норм перегрева константного соединения в зависимости от величины протекающего тока, а также увидеть картину распределения температурного поля по поверхности контакт-деталей.

Наиболее распространенная на настоящее время методика расчета распределения температуры по проводнику учитывает линейное или степенное изменение температуры от центральной точки (оси) контакта в стороны. При небольшом сечении шины уже на расстоянии порядка 20 см обе функции сближаются до уровня погрешности расчета [2] и потому для простоты часто выбирается линейная модель. Однако для шин большого

сечения наряду с учетом распределения перегрева по длине шины важно учитывать и таковое по объему контакт-детали. В настоящее время в качестве шин для подстанций напряжением 110 кВ и выше применяются цилиндрические шины, а также прямоугольные шины различных сечений. В случае использования цилиндрических шин токоотвод осуществляется со всей поверхности шины медным контактом, а при использовании плоских прямоугольных шин широкое распространение получили различного вида соединения, в первую очередь – болтовые. Большие величины сечений шин, характерные для высоких напряжений, приводят к тому, что постоянная времени нагрева для таких шин может принимать значения, равные 10–15 минутам. В этом случае резко-переменный характер нагрузки с кратковременными пиками может привести к тому, что температура на внешней поверхности контакт-детали, для которой и проводится измерение температуры методами термографии, будет значительно отличаться от температуры в зоне непосредственного контакта. В этом случае, особенно при измерении температуры в зимнее время, отдельное внимание должно быть уделено фиксации значения температуры не только на широкой поверхности шины, но и на его торцевой части.

В связи с тем, что для болтовых соединений токоведущих шин на высоком напряжении основным элементом, ведущим к нагреву деталей, является болтовая стяжка или шпилька с двумя болтами, то она чаще всего и является элементом, на котором наблюдается наибольшее превышение температуры. В связи с тем, что для болтов применяются стальные сплавы, коэффициент теплопроводности, равно как и постоянная времени нагрева, для такого элемента будет значительно отличаться от постоянной времени нагрева шин, выполненных из меди или алюминия. Для шин и болтовых соединений на низком напряжении (до 1 000 В) нагрев собственно болтового соединения менее выражен, чем нагрев кабельных оконечников, в связи с чем теп-



Теплограмма контактного соединения при напряжении 220 В и токе 87 А

ловизионная картина воспринимается несколько искаженной: температура оконечников при тепловизионном мониторинге при переменной нагрузке оказывается выше температуры внешних поверхностей болтовых соединений (рисунк). И только тепловизионные измерения, выполненные в плоскости, перпендикулярной оси болтового соединения, позволяют выявить значительный нагрев в межконтактном пространстве.

Особое внимание при проведении тепловизионных измерений в электроконтактных соединениях должно быть уделено двум таким факто-

рам, как погодные условия при проведении работ на открытых распределительных устройствах, а также качество и способ обработки поверхностей контакт-деталей. Наиболее заметным погодным фактором выступает солнечный свет (излучение), отражение которого и последующая фиксация тепловизионной камерой приводит к значительному искажению наблюдаемой тепловизионной картины. При нормативной температуре токоведущих проводов и шин высоковольтных подстанций открытого типа, равной 20°C, которая и наблюдается в осенне-зимний период, наличие прямого солнечного света, падающего на провода и шины, приводит к фиксации «кажущейся» температуры этих проводников на уровне 40–45°C, а в ряде случаев и до 80°C. Такое значение температуры, в соответствии с методическими рекомендациями Международной электротехнической комиссии, является одним из критериев внепланового обслуживания линии электропередач, что приводит к внеплановому выводу линии в ремонт. С учетом того, что большая часть линий электропередач в Тверской области [1] имеет высокую загрузку и не имеет резервирования, вывод даже одной линии по причине ложной диагностики ведет к недоотпуску электроэнергии потребителям. Именно поэтому в соответствии с РД [3] тепловизионные обследования электрических сетей и контактных элементов должны проводиться при строго нормированных условиях.

Второй особенностью, проявляющейся преимущественно в шкафах комплектных распределительных устройств, является высокое качество обработки поверхностей медных шин и контакт-деталей, в связи с чем при температурах токоведущих частей, равных температуре окружающей среды, поверхность металла выполняет роль своеобразного зеркала для других источников тепла (соседние токоведущие части, источники света, тело человека, осуществляющего диагностику). Таким образом, в результате однократной фиксации температурной картины с помощью тепловизора могут наблюдаться случайные очаговые изменения температуры шин и контакт-деталей, не вызванные повреждением или нарушением условий эксплуатации этих элементов.

Заключение. Тепловизионная диагностика элементов электрических сетей, хотя и обладает рядом очевидных преимуществ над другими методами, является достаточно подверженной воздействию случайных факторов, недоучет которых может привести к завышению или занижению реальных значений температур, что влечет за собой вывод работоспособных элементов в ремонт или игнорирование потенциальной опасности, вызванной перегревом ответственных узлов электрических сетей.

Библиографический список

1. Техническое состояние сетей // Компания МРСК Центра: [сайт]. Режим доступа: <http://www.mrsk-1.ru/ru/clients/filial/networks/>
2. Титков, В.В. К вопросу о тепловой диагностике контактных соединений / В.В. Титков, М.И. Сухичев // Электро. 2010. № 3. С. 37-39.
3. РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. М.: Издательство стандартов, 2001. 136 с.

УДК 621.753.1

Э.В. Клюйко

Тверской государственной технической университет

К ВОПРОСУ О РАСЧЕТАХ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В расчетах размерных цепей механизмов предлагается перейти к симметричному представлению размеров с их отклонениями. Это позволяет заменить допуск размера, как основной параметр расчетов, на погрешность размера, которая, в отличие от допуска, является векторной величиной. Замена позволяет упростить расчеты и исключить из них такие параметры как средние, наибольшие и наименьшие отклонения размеров.

Ключевые слова: случайная величина, размер, отклонения, допуск, погрешность

ON THE ISSUE OF A CALCULATION OF A GEOMETRICAL PRECISION OF MECHANICAL SYSTEMS

It is suggested to go over to a symmetrical representation of dimensions with their errors in dimension chain calculation. As a result, the main calculation parameter – dimensional tolerance – may be replaced by sizing error, which is a vector quantity as opposed to dimensional tolerance. Dimensional tolerance replacement by sizing error enables to simplify calculations and exclude from calculations such parameters as average, maximal and minimal size deviations.

Keywords: random quantity, dimension, deviation, dimensional tolerance, error.

В основе оценки геометрической точности различных механизмов лежат расчеты, увязывающие между собой номинальные линейные и угловые размеры элементов конструкции и их отклонения или погрешности. Обеспечение нормативных показателей геометрической точности расчетным путем достигается с помощью размерных цепей, состоящих из отдельных звеньев, роль которых выполняют линейные и угловые размеры и их допуски [1, 2]. Однако в качестве расчетной величины вместо допуска удобнее принять погрешность размера, определяемую как отклонение от номинала, соответствующего середине поля допуска. Погрешность, в отличие от допуска, всегда является векторной величиной, т.е. позволяет представить размер в виде направленного отрезка $X = X_0 + \delta$, полностью отделяя в нем постоянную часть X_0 , соответствующую середине поля допуска, от переменной δ . Это позволяет перейти от изучения самих размеров к изучению их погрешностей. Кроме того, такой подход упрощает расчеты, так как исключает из рассмотрения такие параметры, как среднее отклонение размеров (оно в этом случае равно нулю) и их предельные (наибольшие и наименьшие) отклонения.

Любой угловой или линейный размер X_j в общем случае выражают в виде $X_j = X_{nj} \begin{matrix} \Delta_{1j} \\ \Delta_{2j} \end{matrix}$, где Δ_{1j}, Δ_{2j} – положительное или отрицательное верхнее и

нижнее отклонения размера X_j от номинала X_{nj} . В симметричной форме этот же размер имеет вид $X_j = X_{0j} \pm \delta_{mj}$, где $X_{0j} = X_{nj} + (\Delta_{1j} + \Delta_{2j})/2$ – новый номинал, который можно рассматривать как среднее значение (математическое ожидание) случайной величины X_j , а $\delta_{mj} = (\Delta_{1j} - \Delta_{2j})/2$ – наибольшая возможная погрешность X_j , равная половине ее допуска T_j . Обратный переход от симметричной формы к несимметричной определяется формулами: $\Delta_{1j} = (X_{0j} - X_{nj}) + \delta_{mj}$, $\Delta_{2j} = (X_{0j} - X_{nj}) - \delta_{mj}$, где номинал X_{nj} предполагается заданным.

Как известно, распределение размеров X_j , влияющих на замыкающий размер $X_\Sigma = f(X_j)$, носит случайный характер и чаще всего оценивается линейными функциями последнего от составляющих размеров, входящих в состав размерной цепи, состоящей из n звеньев:

$$X_\Sigma = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n = \sum c_j X_j, \quad (1)$$

где c_j – постоянные коэффициенты влияния X_j на X_Σ , определяемые как частные производные $\partial X_\Sigma / \partial X_j$. Для линейных и угловых размерных цепей $c_j = \pm 1$; для цепей с линейными и параллельно расположенными размерами, вызывающими поворот, коэффициенты c_j определяют как отношение расстояний ℓ_1 и ℓ_2 относительно осей поворота в виде $c_j = \ell_1 / \ell_2$ [2]. Для плоских цепей и пространственных цепей, приводимых к плоским, различные варианты c_j приведены в [3].

Основными числовыми характеристиками случайных величин X_j и X_Σ являются их средние значения M_j , M_Σ и среднеквадратичные отклонения σ_j , σ_Σ от средних значений M_j и M_Σ . Для замыкающих размеров эти характеристики определяются по формулам [2]:

$$M_\Sigma = \sum c_j M_j, \quad \sigma_\Sigma = (\sum c_j^2 \sigma_j^2 + 2 \sum c_i c_j D_{ij})^{0,5}, \quad (2)$$

где M_j , σ_j – соответственно средние значения и среднеквадратичные отклонения составляющих размерных звеньев X_j ; c_i и c_j – коэффициенты влияния коррелируемых между собой размеров X_j и X_i ; D_{ij} – корреляционные моменты между X_i и X_j . При отсутствии корреляции $D_{ij} = 0$ и $\sigma_\Sigma = (\sum c_j^2 \sigma_j^2)^{0,5}$.

Согласно [4] параметры M_j и σ_j любого размера X_j можно заменить их числовыми характеристиками:

$$M_j = X_{nj} + m_j + a_j T_j = X_{0j} + 2a_j \delta_{mj}, \quad (3)$$

$$\sigma_j = k_j T_j / 6 = k_j \delta_{mj} / 3, \quad (4)$$

где m_j – среднее отклонение размера X_j , $m_j = (\Delta_{1j} + \Delta_{2j})/2$; a_j – коэффициент относительной асимметрии рассеяния размеров X_j ; k_j – коэффициент относительного рассеяния, характеризующий отличие действительного поля рассеяния размеров X_j по сравнению с заданным допуском T_j . Число-

вые значения α_j, k_j для различных типов случайных величин (независимых, векторных, с зазором и др.) приведены в [2].

Разделение в (3) среднего значения случайной величины X_j на постоянную и переменную части и учет ее рассеяния и асимметрии позволяют изучать и оценивать на проектной стадии не сами величины X_j , а их погрешности δ_j . Таким образом, из (3) следует, что в качестве характеристики случайной величины X_j можно также рассматривать среднюю погрешность M^* , равную

$$M_j^* = 2 \alpha_j \delta_{mj}. \quad (5)$$

Здесь δ_{mj} – наибольшая возможная погрешность, в отличие от текущей погрешности δ_j , равной $\delta_j = X_j - X_{0j}$.

Для современного машиностроения, развивающегося по пути автоматизации и унификации, характерно формирование размеров изделий при их производстве по законам, близким к нормальному распределению погрешностей изготовления. На рис. 1 показаны кривые распределения случайных величин X_j и X_Σ , когда их поля рассеяния не равны их допускам T_j и T_Σ . Для замыкающих размеров X_Σ кривая распределения погрешности $\delta_{m\Sigma}$ с увеличением числа составляющих размеров приближается к закону нормального распределения (рис. 1б), в соответствии с которым плотность вероятности $p(\delta_{m\Sigma})$ распределения погрешности $\delta_{m\Sigma}$ имеет вид

$$p(\delta_{m\Sigma}) = \frac{1}{\sigma_\Sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\delta_{m\Sigma}^2 / 2\sigma_\Sigma^2} = (2,51 \sigma_\Sigma e^{\delta_{m\Sigma}^2 / 2\sigma_\Sigma^2})^{-1}. \quad (6)$$

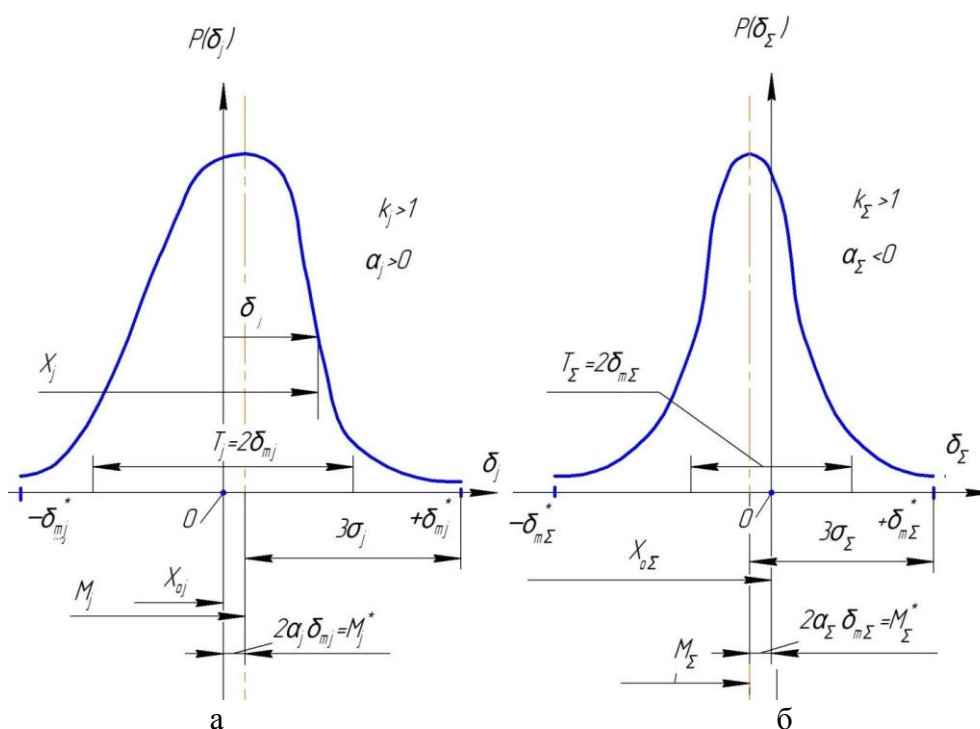


Рис. 1. Кривые плотности вероятности $P(\delta_j)$ распределения погрешностей δ_j (а) и δ_Σ (б) случайных величин X_j и X_Σ , (δ_{mj} и δ_{mj}^* – расчетная и действительная наибольшие погрешности случайной величины)

Заменяя значения M_j и M_Σ и среднеквадратичные отклонения σ_j , σ_Σ независимых случайных величин X_j и X_Σ на их числовые характеристики (3), (4), получим:

$$a_\Sigma \delta_{m\Sigma} = \sum c_j a_j \delta_{mj}, \quad (7)$$

$$k_\Sigma^2 \delta_{m\Sigma}^2 = \sum c_j^2 k_j^2 \delta_{mj}^2, \quad (8)$$

откуда наибольшая погрешность замыкающего размера и его коэффициент относительной асимметрии равны:

$$\delta_{m\Sigma} = \sqrt{\sum (c_j k_j \delta_{mj})^2} / k_\Sigma, \quad (9)$$

$$a_\Sigma = (\sum c_j a_j \delta_{mj}) / \delta_{m\Sigma}. \quad (10)$$

Коэффициент k_Σ в формуле (9) принимают в соответствии с рекомендацией [2], с заменой T на $2\delta_m$, по формуле

$$k_\Sigma = 1 + 0,55 (\sqrt{\sum (c_j k_j \delta_{mj})^2} - \sqrt{\sum (c_j \delta_{mj})^2}) / \sum |c_j| \delta_{mj}. \quad (11)$$

Значение $k_\Sigma = 1$ соответствует 0,27% выхода замыкающего размера за пределы поля допуска T_Σ . Следует иметь в виду, что при определении погрешности $\delta_{m\Sigma}$ коэффициенты влияния составляющих звеньев берутся под знаком модуля в виде $|c_j|$. Поэтому, например, при полной взаимозаменяемости $\delta_{m\Sigma} = \sum |c_j| \delta_{mj}$. В формулах (8), (9), (11) этот знак опущен в связи с возведением c_j в квадрат.

Ряд размерных погрешностей δ_{mj} (зазоры, биения, разностенности) перед подстановкой в (9) необходимо привести к удобному для расчета виду. Зазоры посадок, заданные размерами отверстия (паза) $X_{\Delta_{12}}^{\Delta_{11}}$ и вала (выступа) $X_{\Delta_{22}}^{\Delta_{21}}$, представляют как несоосность (несимметричность) между ними в виде

$$X_j = X_{nj} \pm \delta_{mj} = [(\Delta_{11} + \Delta_{12}) - (\Delta_{21} + \Delta_{22})] / 4 \pm (T_{nj} + T_{\delta j}) / 4, \quad (12)$$

где $\Delta_{11}, \Delta_{12}, \Delta_{21}, \Delta_{22}; T_{nj}, T_{\delta j}$ – верхнее и нижнее отклонения и допуски соответственно отверстия (паза) и вала (выступа). Следовательно, $\delta_{mj} = (T_{nj} + T_{\delta j}) / 4$. Аналогично определяют несоосность для разностенности стаканов, колец, пинолей и т.д. Если же зазоры (толщина стенок, биения и т.д.) заданы предельными значениями $\Delta_{max} \div \Delta_{min}$, то вызываемая ими несоосность $X_j = (\Delta_{max} + \Delta_{min}) / 4 \pm (\Delta_{max} - \Delta_{min}) / 4$, а $\delta_{mj} = (\Delta_{max} - \Delta_{min}) / 4$. Выбираемость зазоров, зависящую от особенностей действия нагрузки в сопряжении, учитывают соответствующими коэффициентами относительного рассеяния k_j .

Симметрирование всех исходных размеров цепи, имеющих разные верхние и нижние отклонения, изменяет их номиналы и нарушает равновесие суммы номиналов размерной цепи $X_{n\Sigma} = \sum c_j X_{nj} = 0$. Для выравнивая указанного равновесия выбирают увязочное звено и соответствующий размер: компенсирующий (при расчетах методом компенсации) и один из наибольших, относительно неточных составляющих размеров (при расче-

тах методом взаимозаменяемости). Уточненный симметричный номинал увязочного размера

$$X_{0y}^* = (X_{0\Sigma} - \sum c_j X_{0j}) / c_y, \quad (13)$$

где c_y – коэффициент влияния увязочного размера $X_y^* = X_{0y}^* \pm \delta_{m_y}$ на замыкающий размер $X_\Sigma = X_{0\Sigma} \pm \delta_{m_\Sigma}$.

При расчетах по методу взаимозаменяемости [2] погрешности на замыкающих размерах определяют по формуле (9). При расчетах по методу компенсации определяют компенсацию $\Delta_k = \delta_{m_\Sigma}^* - \delta_{m_\Sigma}$ между погрешностью $\delta_{m_\Sigma}^*$, вычисляемую по формуле (9) для исходных «завышенных» погрешностей составляющих звеньев размерной цепи, и заданной погрешностью δ_{m_Σ} на замыкающем звене. Размер компенсатора $X_y^* = (X_{y0}^* + \Delta_k) \pm \delta_{m_\Sigma}$.

Пример. Необходимо обеспечить точность расположения осей шпинделей 1, 7 в вертикальной плоскости (рис. 2).

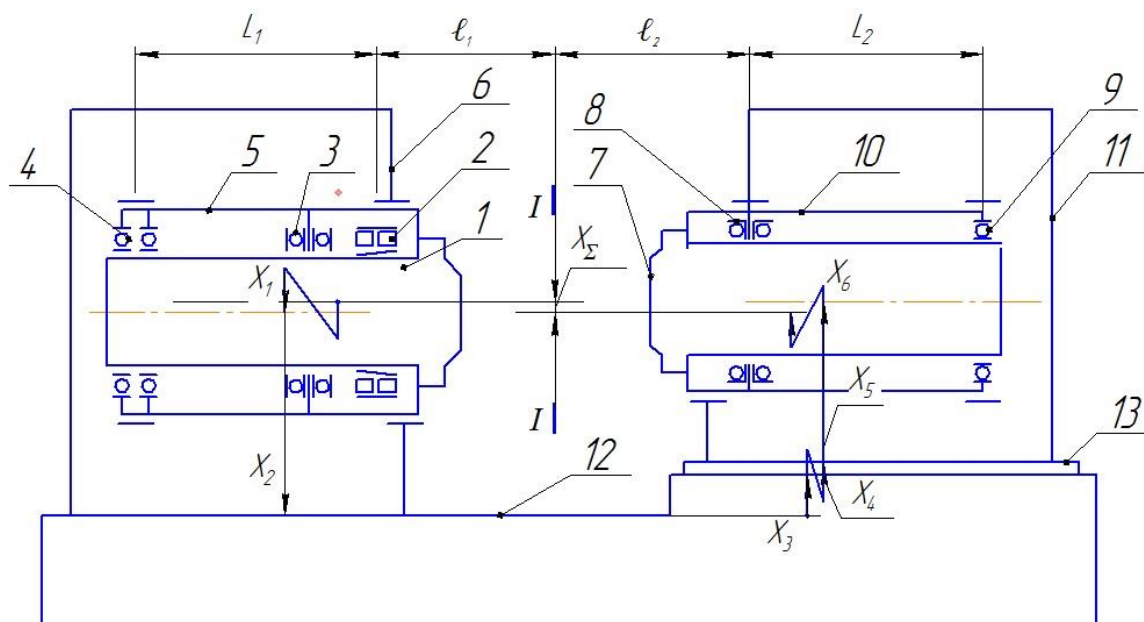


Рис. 2. Компоновка соосных шпиндельных узлов металлорежущего станка

Оба шпинделя установлены на жестких передних опорах, состоящих соответственно из подшипников 2, 3 и 8, и на задних «плавающих» опорах, состоящих из подшипников 4 и 9. Подшипники, в свою очередь, размещены в подвижных пинолях 5 и 10 в корпусах 6 и 11. Все подшипники с предварительным натягом. Требуемая несоосность шпинделей в рабочей зоне не должна превышать величины $X_\Sigma = 0 \pm 0,01$ мм (в плоскости I-I). Составляющие размеры показаны на рис. 2, а числовые параметры (исходные и расчетные) – в таблице. Погрешности δ_{m_j} составляющих размеров X_2, X_3, X_5 превышают погрешность $\delta_{m_\Sigma} = 0,01$ замыкающего размера X_Σ , поэтому требуемую его точность необходимо обеспечить методом компенсации. В качестве компенсатора принята проставка 12 с размером $X_4 = 40 \pm 0,01$. Принимаем этот размер за увязочный и уточняем его номинал по формуле (13):

$$x_{04}^* = (0 - (400 - 300 - 60,05)) / (-1) = 39,95.$$

Характеристики размеров на рис. 2

Наименование			Размеры		Коэффициенты			δ_{mj}
			Исход- ные	Симмет- ричные	c_j	k_j	a_j	
1	Несоосность шпинделей	X_{Σ}	0±0,01	0±0,01	1	$k_{\Sigma} = 1,05$	$a_{\Sigma} = -0,025$	$\delta_{m_{\Sigma}} = 0,01$
2	Несоосность отверстия в корпусе 6 и дорожек качения колец подшипника 2	X_{11}	0±0,008	0±0,008	$\frac{L_1 + \ell_1}{L_1} = 1,25$	0,75	0	0,008
3	Тоже в опоре 4	X_{12}	0±0,008	0±0,008	$\frac{\ell_1}{L_1} = 0,25$	0,75	0	0,008
4	Расстояние от оси шпинделя 1 до опоры в станине 12	X_2	400±0,05	400±0,05	1	1,2	0,1	0,05
5	Расстояние между опорами станины 12	X_3	60±0,1	60,05±0,05	-1	1,2	0,05	0,05
6	Толщина проставки 13	X_4	40±0,01	39,95±0,01	-1	1,2	0	0,01
7	Расстояние от проставки 13 до оси отверстия в корпусе 11	X_5	300±0,05	300±0,05	-1	1,2	0,1	0,05
8	Несоосность отверстия корпуса 11 относительно оси дорожки качения подшипников 8	X_{61}	0±0,008	0±0,008	$-1 - \frac{\ell_2}{L_2} = -1,33$	0,75	0	0,008
9	Тоже в опоре 9	X_{62}	0±0,008	0±0,008	$-\ell_2/L_2 = -0,33$	0,75	0	0,008

Примечания: 1. Ось вращения каждого из шпинделей 1 и 7 определяется общей осью геометрических центров дорожек качения внутренних колец подшипников передней и задней опор. 2. Размер $X_{11}, X_{12}, X_{61}, X_{62}$ – комплексные (учитывают несоосность из-за зазоров в стыках корпус – пиноль, пиноль – наружные кольца подшипников и из-за разностенности пиноли и наружных колец подшипников). Зазоры в самих подшипниках устраняются их регулировкой.

По формуле (9) определяем погрешность замыкающего звена:

$$\delta_{m\Sigma}^* = \frac{1}{1,05}(0,75^2 \cdot 0,008^2 (1,25^2 + 0,25^2 + 0,33^2 + 1,33^2) + 3(1,2 \cdot 0,05)^2 + (1,2 \cdot 0,01)^2)^{0,5} = 0,1 \text{ мм.}$$

Здесь $k_\Sigma = 1,05$ (подсчитано по формуле (11) и по данным таблицы). Коэффициент относительной асимметрии замыкающего звена по формуле (10) $a_\Sigma = -0,025$. Необходимая компенсация Δ_k , достигаемая в данном примере подшлифовкой проставки 13, равна: $\Delta_k = \delta_{m\Sigma}^* - \delta_{m\Sigma} = 0,1 - 0,01 = 0,09 \text{ мм.}$

Уточненный размер компенсатора:

$$X_y^* = (X_{0y}^* + \Delta_k) \pm 0,01 = (39,95 + 0,09) \pm 0,01 = 40,04 \pm 0,01 = 40_{0,03}^{0,05}.$$

Библиографический список

1. Палей, М.А. Допуски и посадки. Справочник в 2 т. / М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. Л.: Политехника, 1991. 1184 с.
2. Дунаев, П.Ф. Расчет допусков размеров / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. М.: Машиностроение, 2006. 400 с.
3. Ключко, Э.В. Векторный метод расчета плоских размерных цепей на точность / Э.В. Ключко. Вестник машиностроения. 1989. № 4. С. 33-36.
4. Бородачев, Н.А. Обоснование методики расчета допусков и ошибок кинематических цепей / Н.А. Бородачев. М.: Издательство АН СССР, 1943. Ч. 1.

УДК 621:681.3

Е.В. Полетаева

Тверской государственный технический университет

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОНТОЛОГИИ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ, ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы формализации знаний при создании автоматизированных систем технологического проектирования. Предложена концепция построения онтологии, отвечающая современным требованиям технологического производства.

Ключевые слова: онтология предметной области, база знаний, технологическое проектирование.

REQUIREMENTS TO MECHANICAL ENGINEERING ONTOLOGY FOR TECHNOLOGICAL DESIGN AUTOMATION

The problems of the knowledge formalization are considered for technological design systems creation. The concept of the subject ontology creation, meeting the modern requirements of technological manufacturing is offered.

Keywords: subject ontology, knowledge base, technological design.

Современные автоматизированные информационные системы в области машиностроения независимо от того, на какой стадии производства они используются (при конструировании, технологической подготовке, научных исследованиях и др.), в качестве своей подсистемы всегда имеют базу данных (знаний). Такая подсистема является не только базовой для специализированной информационной системы, но и основой для ее интеграции с системами, решающими другие производственные задачи. База данных (знаний) является необходимым условием синтеза существующих информационных систем при создании автоматизированного интегрированного производства.

Автоматизированная система, являющаяся реализацией базы знаний в области машиностроения (АБЗМ), состоит из двух подсистем: онтологии АБЗМ и пакета прикладных программ (ППП) АБЗМ. Эти две подсистемы тесно связаны между собой: основой системы является онтология АБЗМ, определяющая структуру и сложность ППП АБЗМ и возможности системы в целом.

В области информационных технологий онтологию некоторой предметной области называют предметной онтологией, а онтологию, включающую понятия, выходящие за пределы предметной области, являющиеся наиболее общими для двух и более предметных областей, называют метаонтологией.

Формально онтология рассматривается как триплет:

$$O = \{T, R, F\},$$

где T – множество концептов предметной области; R – множество отношений между концептами; F – функции интерпретации, заданные на сущностях и/или отношениях онтологии.

Данная онтология состоит из двух: метаонтологии и онтологии предметной области, при этом основными элементами и той и другой онтологий являются термины. Чтобы их различать, онтологию АБЗМ формально представим как

$$O_{ABZM} = \{PO_{ABZM}, M_{ABZM}\},$$

где PO_{ABZM} – предметная онтология АБЗМ; M_{ABZM} – метаонтология АБЗМ.

$$PO_{ABZM} = \{T^n, R^n, F^n\},$$

где T^n – множество терминов предметной онтологии; R^n – множество отношений между терминами предметной онтологии; F^n – функции интерпретации, заданные на терминах предметной онтологии.

Соответственно

$$MO_{ABZM} = \{T^m, R^m, F^m\},$$

где T^m – множество терминов (концептов) метаонтологии; R^m – множество отношений между терминами (концептами) метаонтологии; F^m – функции интерпретации, заданные на терминах (концептах) метаонтологии.

В принятых обозначениях как предметной онтологии, так и метаонтологии вместо термина «множество концептов» использован термин «множество терминов». Действительно, в математической логике «концепт» и «смысл понятия» являются синонимами. Это объясняется тем, что в научной литературе термин «концепт» употребляется тогда, когда абстрагируются от культурного содержания, а говорят только о структуре. Точно так же этот термин используется в математической логике. В культурологии, напротив, понимание смысла включает нечто большее, например сжатую и синтезированную в одно целое историю концепта. Надо отметить, что с точки зрения культурологии такое понимание смысла является доминирующим в структуре концепта, т.е. существуют особые термины, обозначающие наиболее общие категориальные понятия, которые можно назвать концептуальными.

Производственная система, для которой создается база знаний, представляет собой социо-техническую систему, поэтому в ней должны учитываться культурологические особенности, ее описывающие. Так как предметная онтология и метаонтология синтезируются в одну систему, а в их основе лежат термины, то корректнее все их множество разделить на множество терминов предметной онтологии и множество терминов метаонтологии, которое по сути в свете вышесказанного является концептуальной терминологией.

Современные компьютерные системы, несмотря на их разнообразие и продвинутость, предоставляют пользователю для построения его системы две возможности: ввод и хранение информации и ее обработку. Соответственно две первые составляющие любой онтологии (множество терминов и множество отношений между ними) могут быть представлены в виде базы данных, а третья (функции интерпретации) – в виде обработчика, т.е. программно.

Концептуальная терминология является основой для системы в целом, а ее формальное описание во многом определяет свойства предметной онтологии и метаонтологии. К метаонтологии предъявляются требования:

1. Концептуальная терминология включает только термины, обозначающие категории по отношению к терминам предметной области, при этом любое понятие, обозначаемое термином предметной онтологии при обобщении, всегда подпадает под ту и/или иную категорию метаонтологии. Другими словами, объем любого понятия, обозначаемого термином предметной онтологии, входит в объем одного или нескольких понятий метаонтологии.

2. Количество концептуальных терминов должно быть достаточным для описания предметной области, но не должно быть больше необходимого, чтобы не было дублирования, которое могло бы усложнить всю систему и создать при интерпретации (программной обработке) неразрешимые ситуации с логической точки зрения.

3. Метаонтология должна быть логически непротиворечивой и являться системообразующей всей онтологии; ее структура определяет структуру предметной онтологии, на ее основе строится алгоритм проверки целостности системы.

4. Концептуальная терминология должна быть расширяема без кардинального изменения структуры и содержания программного обеспечения.

Соответственно к предметной онтологии предъявляются требования:

1. Структура предметной онтологии обуславливается структурой концептуальной онтологии, при этом каждый термин предметной онтологии, обозначающий то или иное понятие, обязательно связан с терминами концептуальной терминологии, обозначающими категориальные понятия.

2. В своей структуре предметная онтология содержит свои концептуальные термины. Их структура, с одной стороны, отражает теоретические концепции предметной области, а с другой стороны, они должны быть представлены в терминах концептуальной терминологии.

3. При добавлении новых элементов в концептуальную терминологию (терминов, связей и др.) уже существующая структура предметной терминологии не должна нарушаться: возможны только дополнения.

Библиографический список

1. Норенков, И.П. Интеллектуальные технологии на базе онтологий / И.П. Норенков // Информационные технологии. 2010. № 4. С. 17-91.

2. Полетаева, Е.В. К проблеме анализа-синтеза производственных систем в условиях автоматизированного технологического проектирования / Е.В. Полетаева, Р.А. Галюзин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2012. С. 58-60.

3. Полетаева, Е.В. Принципы построения базы знаний информационной системы машиностроительного производства: монография / Е.В. Полетаева. Изд. 1-е. Тверь: ТвГТУ, 2010. 136 с.

УДК 621:681.3

Е.В. Полетаева, М.П. Вильмс
Тверской государственный технический университет

СИНТЕЗ СИМВОЛЬНОЙ И ГРАФИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Рассмотрена проблема формализации связи символьной и графической информации при создании автоматизированной системы технологического проектирования.

Ключевые слова: онтология предметной области, база знаний, технологическое проектирование.

REQUIREMENTS TO MECHANICAL ENGINEERING ONTOLOGY FOR TECHNOLOGICAL DESIGN AUTOMATION

The problems of the knowledge formalization are considered for technological design systems creation. The concept of the subject ontology creation, meeting the modern requirements of technological manufacturing is offered.

Keywords: subject ontology, knowledge base, technological design.

Автоматизация технологического проектирования предполагает создание модели – формального описания структуры и функционирования машиностроительного производства. Основу такой модели с точки зрения семиотики составляют характеризующие знаки. Характеризующий знак, который обнаруживает в себе свойства денотата (обозначаемого объекта), называется иконическим характеризующим знаком, если нет – символическим. Основную структуру базы данных (знаний), используемой при создании модели, составляют символические характеризующие знаки-термины. Кроме того, в машиностроении важную роль играют иконические знаки как при создании модели, так и при ее использовании. Это чертежи, эскизы, схемы и другие знаки-образцы, которые невозможно описать с помощью знаков-символов. Можно только каждому иконическому знаку поставить в соответствие символический знак. В свою очередь, сами иконические знаки могут в самих себе содержать символические характеризующие знаки (символы-обозначения).

Современные автоматизированные системы, решающие задачи технологического проектирования, используют модели, созданные на предыдущих этапах машиностроительного производства, в частности сборочные чертежи, рабочие чертежи деталей, содержащие параметры, представленные в символьном виде в базе данных (знаний). Как правило, инженеру приходится вторично вводить вручную параметры для того, чтобы построить модели для решения задач технологического проектирования. При этом одна и та же информация несколько раз вводится вручную на разных этапах. Для решения этой проблемы предлагается следующая структура информационной системы.

Предметная область машиностроения может быть представлена в виде модели, основу которой составляет множество характеризующих символических знаков-терминов и связей типа *род-вид*, *система-элемент* и др. В информационной системе им соответствуют отношения реляционной базы данных: *pttermin* (рис. 1), здесь *ptCode* – код термина, выраженный целым числом, *ptName* – слово (термин); *pTielrd* описывает две связи: между родовым и видовым понятиями и между видовыми понятиями, полученными при делении родового понятия по одному основанию, здесь *ptlRd* – номер связи, *plCodr* – код термина родового понятия, *ptlCodd* – код термина видового понятия, *ptlDd* – номер связи между видовыми понятиями, полученными при делении родового понятия по одному основанию.

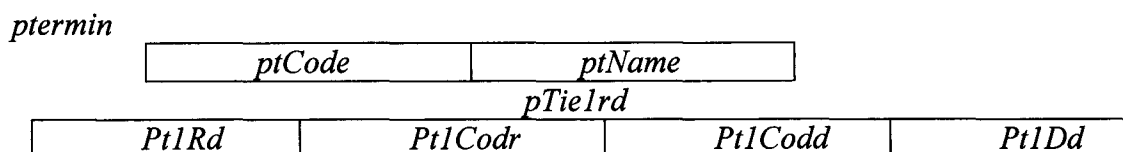


Рис 1. Отношение *ptermin* и *pTielrd* реляционной базы данных, описывающее множество терминов и связей между ними в предметной области машиностроения

Иконические знаки, как правило, представлены графическими файлами. Для ее связи с терминологической системой предметной области введем отношение *piPic* (рис. 2). Здесь *piN* – номер иконического знака, *piCode* – код термина предметной области, *piPicture* – символьное обозначение иконического знака.

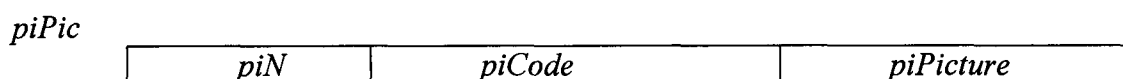


Рис. 2. Отношение *piPic*, описывающее связь между термином предметной области и соответствующим иконическим знаком

Проиллюстрируем использование эскизов для различных видов термина «цилиндр наружный». Выявлено 7 видов родового понятия, для которых существуют эскизы (рис. 3). На рисунке представлен код для каждого видового понятия и имена файлов, в которых хранятся эскизы.

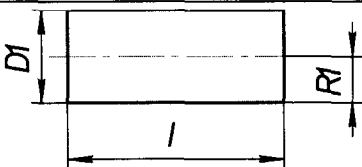
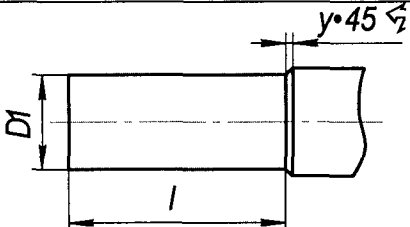
Код термина	Наименование термина	Имя графического файла	Эскиз, соответствующий термину
1	2	3	4
...			
0581	Цилиндрическая открытая поверхность	i0581	
0584	Цилиндрическая полузакрытая ступенчатая поверхность	i0585	
0585	Цилиндрическая полузакрытая поверхность с фаской	i0585	

Рис. 3. Эскизы для разных видов родового понятия, обозначаемого термином «цилиндр наружный»

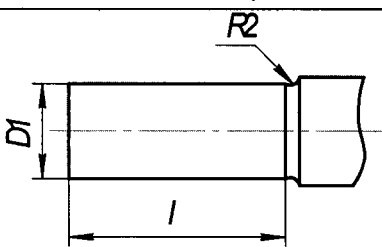
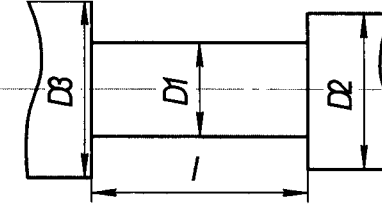
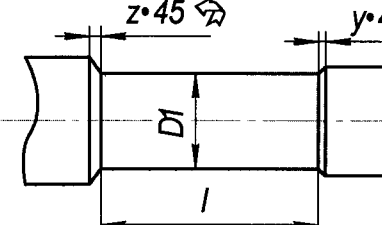
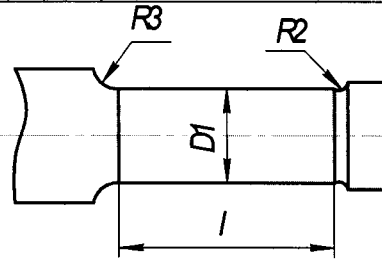
1	2	3	4
0586	Цилиндрическая полузакрытая поверхность со скруглением	i0586	
0587	Цилиндрическая закрытая ступенчатая поверхность	i0587	
0588	Цилиндрическая закрытая поверхность с фасками	i0588	
0589	Цилиндрическая закрытая поверхность со скруглениями	i0589	
...			

Рис. 3. Продолжение

Информация о понятии, обозначаемом термином «цилиндр наружный» и его видовых понятиях, представлены отношениями *ptermIn* (рис. 4) и *ptielrd* (рис. 5).

<i>ptCode</i>	<i>ptName</i>
...	
0580	Поверхность цилиндрическая наружная
0581	Поверхность цилиндрическая открытая
0582	Поверхность цилиндрическая полузакрытая
0583	Поверхность цилиндрическая закрытая
0584	Поверхность цилиндрическая полузакрытая ступенчатая
0585	Поверхность цилиндрическая полузакрытая с фаской
0586	Поверхность цилиндрическая полузакрытая со скруглением
0587	Поверхность цилиндрическая закрытая ступенчатая
0588	Поверхность цилиндрическая закрытая с фасками
0589	Поверхность цилиндрическая закрытая со скруглениями
...	

Рис. 4. Фрагмент системы, описывающий отношение *ptermIn* предметной области знаний, включающий термины, обозначающие видовые понятия термина «цилиндр наружный»

Фрагмент отношения *piPic* реляционной базы данных представлен на рис. 6.

<i>PtIRd</i>	<i>PtICodr</i>	<i>PtICodd</i>	<i>PtIDd</i>
...			
0100	0580	0581	1
0101	0580	0582	1
0102	0580	0583	1
0103	0582	0584	1
0104	0582	0585	1
0105	0582	0586	1
0106	0583	0587	1
0107	0583	0588	1
0108	0583	0589	1
...			

Рис. 5. Фрагмент системы, описывающий отношение *pTielrd* предметной области, включающий термины, обозначающие видовые понятия родового понятия, обозначаемого термином «цилиндр наружный»

<i>piN</i>	<i>piCode</i>	<i>piPicture</i>
...		
0300	0581	i0581
0301	0584	i0584
0302	0585	i0585
0303	0586	i0586
0404	0587	i0587
0405	0588	i0588
0406	0589	i0589
...		

Рис. 6. Фрагмент предметной онтологии, описывающий отношение *piPic*, включающее связи между видами родового понятия, обозначаемого термином «цилиндр наружный»

Иконический знак, в свою очередь, может содержать символы-обозначения, для которых в предметной онтологии существуют символические знаки. Например, символу-обозначению *D* на эскизе может соответствовать символический знак «Диаметр отверстия». Если необходимо установить связи между такими объектами, необходимо ввести в систему соответствующее отношение реляционной базы данных.

Такое построение информационной системы позволяет на этапе ее разработки увязать символические и иконические знаки, используемые в предметной области машиностроения, тем самым исключив дублирование при вводе информации и создав базу для построения эффективных алгоритмов и программ для решения задач технологического проектирования.

Библиографический список

1. Андриченко, А.Н. Справочные данные и знания в управлении производством / А.Н. Андриченко // САПР и графика. 2009. № 7. С. 58-61.
2. Полетаева, Е.В. К проблеме анализа-синтеза производственных систем в условиях автоматизированного технологического проектирования / Е.В. Полетаева, Р.А. Галузин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2012. С. 58-60.
3. Полетаева, Е.В. Принципы построения базы знаний информационной системы машиностроительного производства: монография / Е.В. Полетаева. Тверь: ТвГТУ, 2010. 136 с.

УДК 621.9-11

В.Г. Прохоров, Г.И. Рогозин
Тверской государственной технической университет

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ БАЗОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ И СХЕМЫ ЕЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

В работе рассматривается влияние отклонения формы и расположения плоских базовых поверхностей на точность металлообработки резанием. Показан механизм образования погрешности обработки, обусловленной разворотом заготовки при обеспечении контакта ее базовых поверхностей с опорными поверхностями установочных элементов станочного приспособления.

Дается заключение о необходимости учитывать ее в практике прогнозирования ожидаемой точности механообработки.

Ключевые слова: операционная точность металлообработки резанием, погрешности, базовые поверхности, номинальный профиль, отклонение формы и расположения, разворот обрабатываемой детали, расчет.

EFFECT OF A WORKPIECE BASIC SURFACE GEOMETRY AND A SCHEME OF ITS LOCATION ON METAL CUTTING ACCURACY

The effect of deviations of form and position of flat base surfaces on metalworking cutting precision is considered. The mechanism of the processing errors formation is shown. The processing errors are caused by workpiece turn while ensuring the contact of its basic surface with base bearing surface of adjusting elements of machine tools.

The necessity of taking into account the above mentioned error in the practice of forecasting of the expected accuracy of machining has been argued.

Keywords: operating precision of metalworking cutting, error, base surface, the nominal profile, form and location deviation, the work piece turn, calculation.

В настоящее время экономическая конкурентоспособность страны все больше определяется уровнем развития обрабатывающих производств. Необходимость подъема индустриального производства обусловлена и успехами информационных технологий. Все больше появляется программных продуктов САПР, обеспечивающих широкие возможности многофакторных решений. Для их насыщения, производственной адаптации и эффективной реализации требуется соответствующее расширение базовых инженерных расчетов. Это относится, прежде всего, к машиностроению, где опорной отраслью является механообработка на металлорежущих станках. В автоматизированную систему технологической подготовки механообрабатывающего производства входит ряд программ по разработке технологических процессов. Но в этих программах пока дефицитом являются автоматизированные инженерные расчеты технологических процессов, основанные на размерном анализе конструкций изделий. Кафедра

ТАМ ТвГТУ выполнила ряд работ в этом направлении и продолжает подобные разработки по тематике НИР, включая УНИРС.

Особенность создания автоматизированного расчета, тем более, включающего на отдельных этапах автоматический режим, состоит в обеспечении его обоснованности, так как внедрение некорректной программы чревато тиражированными экономическими потерями. Поэтому функциональные зависимости и соответствующие аналитические выражения, отражающие суть технологических процессов и лежащие в основе математического обеспечения программы, должны иметь полное и всестороннее обоснование.

Результаты исследований функциональной и аналитической зависимости операционной точности механообработки, размещенные в публикациях, не охватывают возникающих сегодня вопросов или не дают однозначного ответа. Это относится, например, к вопросам базирования заготовки, расчета припусков, расчета станочного приспособления на точность его изготовления, разработки расчетной схемы при проектировании зажимного устройства, влияния на точность обработки геометрических параметров заготовки.

Постановка задачи. В настоящей работе продолжается изучение факторов, влияющих на точность размера, получаемого при металлообработке резанием. Известны различные зависимости, где эти факторы учитываются. Для условий среднесерийного производства устоявшаяся функциональная зависимость представлена в работе [1]:

$$T = f(\xi_{\sigma}; \xi_{\Sigma}; \xi_{\text{И}}; \xi_{\text{ПС}}; \xi_{\text{О}}; \xi_{\text{Н}}; \Delta_{\text{рег}}; \Delta_{\text{изм}}; \Delta_{\text{у}}; \Delta_{\text{И}}; \Delta_{\text{с}}; \Delta_{\text{т}}). \quad (1)$$

В левой части этого выражения находится допуск операционного размера, а в правой представлен ряд погрешностей, сопровождающих процесс механообработки. Таким образом, эта зависимость представляет собой технологический баланс точности, отражающий влияние факторов, имеющих место при достижении заданного операционного размера. Если сгруппировать эти факторы по месту и времени их проявления, то получим три группы. Первые шесть погрешностей (ξ_i) возникают при установке заготовки и станочного приспособления для каждой наладки станка; вторая группа включает следующие (по порядку записи) две погрешности, сопутствующие настройке инструмента на размер относительно установочных элементов (опор) на приспособлении; остальные четыре (справа) возникают в процессе обработки. Таким образом, проявляется влияние трех из четырех компонентов технологической системы на точность обработки: станочного приспособления, инструмента и собственно станка.

Четвертый компонент, заготовка (конкретнее – характеристика формы и расположения ее базовых поверхностей), оказывается «в стороне» всегда, когда измерительная и технологическая базы совпадают, и если не совпадают, то учитывается только размерный допуск, определяющий точ-

Нижнее основание, принятое в качестве установочной базы, в приспособлении воспроизводится тремя опорами (штырями), позволяющими полностью использовать габариты установочной поверхности. Типовая форма ее реального профиля сводится к двум вариантам расположения отклонений линии, соединяющей точки реального профиля на концах нормируемого участка. В первом варианте при совмещении этой линии с опорами поворот заготовки не происходит и угол поворота $\gamma = 0$. Во втором варианте линия, соединяющая края профиля в реальном сечении, окажется в положении, повернутом относительно базовой линии номинального профиля на угол γ . Этот угол поворота определяется отклонением формы и расположения T_z базовой поверхности заготовки на длине опорного участка, равной a в поперечном сечении (по координате x) и $2a$ – в продольном сечении (по координате y). Если направляющая и опорная поверхности приспособления формируются плоскостями, то при установке заготовки основанием на штыри произойдет ее поворот вокруг точки O , которая, в зависимости от направления разворота заготовки, находится либо в нижнем левом углу (см. рис. а и г), либо (см. рис. б) в правом верхнем углу (на пересечении перпендикуляров к номинальным профилям из точек контакта заготовки с опорами в процессе ее установки).

Точка $k1$ (см. рис.) определяет координаты настройки режущего инструмента относительно установочных элементов (опор) для заготовки при автоматическом получении размеров b , h и ℓ , когда ее номинальный профиль совпадает с фиксированным номинальным профилем, образуемым установочными элементами станочного приспособления. После силового замыкания основания заготовки с опорами, когда произойдет ее разворот, точка $k2$ (см. рис.) показывает смещение измерительных баз заготовки по координатам z , x , y (рис. в) на величину Δx , Δz , Δy относительно инструмента. В результате, происходит изменение заданных размеров по соответствующим координатам: $\Delta b = \Delta x$; $\Delta h = \Delta z$; $\Delta \ell = \Delta y$.

Использование в качестве опорных точек 4 и 5 установочных штырей приведет к сдвигу заготовки в сторону, противоположную росту Δx , и погрешность механообработки Δb в направлении координаты x , обусловленная разворотом заготовки, уменьшится, что определяет целесообразность применения штырей. Для полной компенсации смещения измерительной базы для размера b необходимо расположить штыри на уровне соответствующей координаты настройки инструмента. Те же выводы применимы в отношении расположения заготовки в направлении опорной поверхности, т.е. координаты y , где установка заготовки на штырь уменьшит смещение $\Delta \ell$.

Для размера h (заданного от нижнего основания номинального профиля поперечного сечения заготовки) смещение Δh носит компенсационный характер, обусловленный совмещением крайних точек реального про-

филя с выбранным номинальным профилем заготовки, т.е. разворот заготовки на угол γ не вызовет изменения размера. Но если измерительной базой является верхнее основание заготовки (для размера, равного $a - h$), то смещение Δh добавится к погрешности базирования, которая в этом случае не равна нулю.

Оценивая величину смещения измерительных баз обрабатываемой детали (Δb , Δh и $\Delta \ell$), заметим, что она определяется углом разворота заготовки и соответствующей координатой точки $k1$. Если точка O находится в нижнем левом углу, то в соответствии с рисунком, численные значения погрешностей Δb , Δh и $\Delta \ell$ находятся по аналитическим зависимостям: $\Delta b = Z T_z/a$; $\Delta \ell = Z T_z/2a$; отклонение размера h по координате z в плоскости zox , $\Delta h_x = X T_z/a$ и отклонения размера в плоскости zoy , $\Delta h_y = Y T_z/2a$. Здесь Z , X , Y – координаты точки $k1$, определяемые номиналами размеров h , b , ℓ . Если точка O находится в правом верхнем углу, то погрешности размеров находятся по аналитическим зависимостям: $\Delta b = (a - Z)T_z/a$; $\Delta h_x = (a - X)T_z/a$; отклонения размера h по координате z в плоскости zoy и отклонения размера ℓ определяются аналогичным образом (на рисунке не показаны).

Пусть при повороте заготовки вокруг точки O слева внизу выполняются по 12-му качеству операционные размеры: $b = 20 \pm 0,1$ с координатой $X = 20$ мм; $h = 120 \pm 0,175$ с координатой $Z = 120$ мм и $\ell = 150 \pm 0,2$ с координатой $Y = 150$ мм. Размер установочного базового участка заготовки в сечении $a = 100$ мм; $T_z = 0,087$ мм (основание обработано по 9-му качеству). В принятом примере по координате z образующая точка $k1$ находится за пределами размера базового участка (при $a = 100$ мм $Z = 120$ мм), причем превышение в 1,2 раза соответствует существующим рекомендациям, как предельное. Тогда $\Delta b = Z T_z/a = 120 \cdot 0,087/100 = 0,1$ мм; $\Delta \ell = Z T_z/2a = 120 \cdot 0,087/200 = 0,05$ мм; $\Delta h_x = X T_z/a = 20 \cdot 0,087/100 = 0,017$ мм; $\Delta h_y = Y T_z/2a = 150 \cdot 0,087/200 = 0,065$ мм. Результаты расчета показывают, что для размера b возможная погрешность Δb составляет половину допуска на размер; для размера ℓ соответствующая погрешность равна четверти допуска на размер, а для размера h составляющая погрешности в плоскости zoy больше, чем в плоскости zox , ее и следует учитывать.

Заключение. Очевидно, что какими бы ни были общие рекомендации по соотношению геометрических параметров получаемых размеров и соответствующих опорных элементов станочного приспособления, конкретным технологическим требованиям соответствуют определенные требования по выбору типа установочных элементов и их размещению. Приведенная здесь оценка ограничена конкретными, но типовыми условиями. Результаты этой оценки показывают необходимость разработки методики автоматизированного анализа геометрических параметров зоны располо-

жения заготовки в зависимости от геометрии ее реального профиля, ориентации при установке и требования операционной точности.

Характер погрешности, вызываемой поворотом устанавливаемых заготовок, относится к числу случайных. Поэтому в аналитическую зависимость точности операционного размера (выражение 1) рассматриваемая часть общей погрешности механообработки добавится, как составляющая суммы вероятностного сложения. Обозначив ее как Δ_p , где p – символ пространственного отклонения, получим обновленное выражение технологического баланса операционной точности механообработки резанием:

$$T = f(\xi_6; \xi_3; \xi_{и}; \xi_{пс}; \xi_0; \xi_{н}; \Delta_p; \Delta_{рег}; \Delta_{изм}; \Delta_y; \Delta_{и}; \Delta_c; \Delta_t;). \quad (2)$$

Данная погрешность учитывается статистической экономической точностью ω . Поэтому упрощенное выражение $T = \omega + \xi_6$ не изменит своей формы и значения для прогноза операционной точности. Но при отработке технологического процесса, на стадии его анализа и при разработке программных продуктов оценка составляющих приведенной функции, вес которых сравним с другими составляющими, обеспечит большую достоверность результатов.

Рекомендуется также для реализации базирования по плоскости использовать штыри, которые не только определяют зону приложения сил закрепления, но способствуют уменьшению погрешности механообработки, обусловленной отклонениями формы и расположения базовой поверхности заготовки, и тем в большей степени, в какой их местоположение отвечает координатам размерной настройки, т.е. положению точки к1.

Библиографический список

1. Рогозин, Г.И. Модель построения технологических размерных расчетов / Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов, В.Г. Прохоров // Вестник Тверского государственного технического университета. Тверь: ТГТУ, 2007. № 10. С. 106-110.
2. Прохоров, В.Г. Вопросы разработки станочного приспособления / В.Г. Прохоров, Г.И. Рогозин, А.А. Королев // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2012. № 5. С. 60-66.

УДК 621.311:658.26

Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, Е.В. Воробьева
Тверской государственной технической университет

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ САПР ТП С РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ БАЗОЙ ЗНАНИЙ

Рассмотрена проблема построения системы автоматизированного проектирования технологического процесса (САПР ТП) с развивающейся базой знаний (РБЗ). Проанализированы имеющиеся промышленные автоматизированные системы управления технологическими процессами. Выявлена и обоснована необходимость построения САПР ТП с РБЗ. Приведены принципы построения САПР ТП с РБЗ.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования технологического процесса, развивающаяся база знаний, технологическая подготовка производства, модель накопления и обобщения информации.

METHODOLOGICAL BASES OF A CREATION OF A MANUFACTURING PROCESS COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM WITH DEVELOPING KNOWLEDGE BASE

The problem of a creation of a manufacturing process computer-aided design system with developing knowledge base is considered. The available industrial manufacturing process computer-aided design systems have been analyzed. The necessity of manufacturing process CAD systems with developing knowledge base is shown and justified. The principles of such systems are given.

Keywords: computer-aided design system, developing knowledge base, production planning, model of accumulation and generalization of information.

Большинство современных машиностроительных предприятий характеризуется многономенклатурностью выпускаемых изделий, частой сменой видов изделий при одновременном уменьшении времени на технологическую подготовку производства (ТПП).

Сегодня активно происходит реализация элементов искусственного интеллекта (ИИ) в САПР ТП [1–4, 5, 8, 9], позволяющая значительно сократить длительность ТПП, однако одного этого направления развития САПР ТП явно недостаточно.

Основы построения САПР ТП с РБЗ. На основе анализа [1–4, 6–9] были уточнены принципы, полагаемые в основу создания САПР ТП с развивающейся базой знаний:

1. Информационная и временная интеграция с АПУТП.
2. Интеграция с системами поддержки жизненного цикла изделия.
3. Реализация в САПР ТП процедур накопления и обобщения информации (опыта проектирования).

Последнее мероприятие предполагает реализацию процедур накопления и обобщения опыта применения критериев (1) и обобщения и накопления опыта проектирования (2).

Наиболее интересны процедуры обобщения (ОБ) и накопления (Н) опыта проектирования, которые состоят в том, что каждое технологическое решение (TP_i) запоминается с соответствующим множеством признаков детали (MPP_K), включающих множество структур $\{S_{lk}\}$ и параметров $\{P_{jk}\}$ детали, и множества организационно-производственных признаков $ORPP_k$, определяющих организационные и производственные условия выполнения технологического процесса (ТПр), целевую функцию (ЦФ), оборудование, инструмент, оснастку:

$$TP_i \leftrightarrow \langle \{ \{S_i\}, \{P_i\}, ORPP_k \} \rangle, MK_k = \langle \{ \{S_i\}, \{P_i\}, ORPP_k \} \rangle.$$

Для каждого вида решения TP_i накапливаются множества $\{MK_k\}$, обобщением которых получается технологический образ O . Выявляется интервал технологических решений ΔTP_i , соответствующий одному и тому же образу. TP_i^{Π} , проверенные в ТП, должны:

$$TP_i^{\Pi} \leftrightarrow \langle \{ S_i^{\Pi} \in \{ \cup S_l \}; \{ P_j^{\Pi} \} \in \{ \Delta P_j \}; \{ ORPP^{\Pi} \} \in \{ \Delta ORPP \} \} \rangle.$$

В этом случае решение считается достоверным. Технологический образ получается обобщением опыта: $TP_i^{\Pi} \times TP_i \times \{MPP_K\} \rightarrow O_i$ и характеризуется определенными интервалами допустимых значений $\{ \Delta MPP \}$ и $\{ \Delta ORPP_j \}$. Образ O_i :

$$O_i = \langle \{ S = \{ \cup S_l \}, \{ \Delta P_j \}, \{ \{ \Delta ORPP_j \}_i \} \wedge \{ HD \} \} \rangle,$$

где $\{HD\}$ – множество номеров и названий детали, для которого проектировались технологические процессы.

Накопление и обобщение опыта следует производить поэтапно, начиная с минимального состава элементов в множествах MPP_K , постепенно расширяя их до полных объемов, строя иерархию образов. Полное MPP_K позволяет непосредственно выбирать TP_i любого уровня.

Частным случаем накопления и обобщения является их межуровневая процедура:

$$TP_i^j \leftrightarrow \{ TP_i^{j-1}, MK'_k \}; TP_i^j \times TP_i^{j\Pi} \times MPP'_K \times TP_i^{j-1} \rightarrow O_i^j;$$

$$O_i^j = \{ TP_i^{j-1}, MPP'_K \},$$

где j – номер уровня; MPP'_K – подмножество множества MPP_K , необходимое для синтеза TP_i^j на основе решения предыдущего уровня TP_i^{j-1} .

Процедуры Н и ОБ решений строятся по уровням, каждому соответствует образ (O). На первом уровне накапливается и обобщается информация по методам получения заготовок ($MЗ$), маршрутам обработки ($МОП$) и этапам ($Э$) изготовления детали.

Для методов получения заготовки (3), признаками $МП_1^1$, однозначно определяющими ее выбор, являются:

$$Z_i \leftrightarrow \langle \{TД_l, S_l \{PK_{jl}\}, N, МД, m, \{ОРП_j\}, ЦФ, НД\}_K \rangle = МП_{1В}^1,$$

где Z_i – i -й метод получения заготовок; $TД_l$ – тип детали; S_l – граф связей поверхностей, определяющий контур заготовки; $\{PK_{jl}\}$ – его размерные параметры; N – годовая программа выпуска; $МД$ – материал детали; m – масса; $НД$ – номер детали; $ЦФ$ – целевая функция. Процедура формирования образа:

$$\{Z_i\} \times \{МП_{1В}^1\} \rightarrow \{O_{1i}^1\};$$

$$O_{1i}^1 = \langle \{ \{TД_l\}, \{S_l\}, \{\Delta PK_{jl}\}, \Delta N, \{МД\}, m, \{ОРП_j\}, \{НД\}, \{ЦФ\} \}_i \rangle.$$

Маршрут обработки поверхностей определяется параметрами $МП_2^1$.

$$МОП_i \leftrightarrow \langle \{ВП_m, Z_i, СПЗ_i, \{РП_j\}_m, S_m, \{ТР_j\}_m, ШП_m, МД, N, ФМ_m, \{ОРП_i\}, \{НД\}\} \rangle = МП_{2m}^1,$$

где $ВП_m$ – вид поверхности; $СПЗ_i$ – системные параметры заготовки, включающие размерные связи между ее поверхностями и точность размеров; $\{РП_j\}_m$ – множество размеров поверхностей; S_m – связи поверхностей с другими; $\{ТР_j\}_m$, $ШП_m$ – множества, определяющие параметры точности размера и взаимного расположения; $ФМ$ – физико-механические свойства поверхности.

$$\{МОП_i\}^П \times \{МОП_i\} \times \{МП_{2m}^1\} \rightarrow \{O_{2i}^1\};$$

$$O_{2i}^1 = \langle \{ \{ВП_m, \{Z_i\}, \{СПЗ_i\}, S = \cup S_m, \{\Delta ТР_j\}, \{РП_j\}_m, ФМ_m, \{\Delta ШП_j\}, \Delta N, \{МД\}, \{ОРП_j\} \} \} \rangle.$$

Практической проверке подлежат точность и шероховатость обработанной поверхности. Этапы обработки \mathcal{E}_K определяются признаками $МП_{1K}^3$:

$$\mathcal{E}_K \leftrightarrow \langle \{TД_l, Z_i, СПЗ_i, \{РП_{jm}\}, S_D, \{ОРП_j\}, ЦФ, МД, \{ФМ_m\}, N, \{ТР_{jm}\}, \{ШП_m\}_k \rangle.$$

Процедура обобщения-создания образа:

$$\{ \mathcal{E}_K \}^П \times \{ \mathcal{E}_K \} \times \{ МП_{1K}^3 \} \rightarrow \{ O_{3K}^1 \},$$

а образ O_{3K}^1 :

$$O_{3K}^1 = \langle \{ \{TД_l\}, \{Z_i\}, \{СПЗ_i\}, \{\Delta РП_{jm}\} S_D^B, \{МД\}, \{ФМ_m\}, \{\Delta N\}, \{ОРП_j\}, \{\Delta ТР_{jm}\}, \{\Delta ШП_{jm}\}, \{НД\} \} \rangle,$$

где S_D^B – размерные связи технологических баз детали.

Маршрут обработки детали определяется признаками $МП_{1i}^2$:

$$M_i \leftrightarrow \left\langle \left\{ \begin{array}{l} \{TD_l\}, S_D^B, \{Z_i\}, \{СПЗ_i\}, MD, \{\Phi M_m\}, \\ \{N\}, \{ОП_j\}, \{ТР_{jm}\}, \{ШП_{jm}\}, \{ОР\} \end{array} \right\} \right\rangle = MP_{li}^2,$$

где $\{ОР\}$ – множество определяющих размеров детали (длина, ширина, высота, приведенный диаметр и т.д.) – граф общих размеров детали.

$$\{M_i\}^П \times \{M_i\} \times \{MP_1^2\} \rightarrow \{O_{li}^2\};$$

$$O_{li}^2 = \left\langle \left\{ \begin{array}{l} \{TD_l\}, S = \cup S_D^B, \{Z_i\}, \{СПЗ_i\}, \{HD\}, \{\Delta N\}, \{\Delta ТР_{jm}\}, \\ \{\Delta ШП_{jm}\}, \{MD\}, \{\Delta ОР\}, \{\Phi M_m\}, \{ОП_j\}, \{ЦФ\} \end{array} \right\} \right\rangle.$$

Операционная технология определяется признаками MP_{li}^3 :

$$OP_i \leftrightarrow \left\langle \left\{ \begin{array}{l} TD_l, S_D, Z_i, СПЗ_i, \{ОП_j\}, \{ТР_{jm}\}, \\ \{ШП_{jm}\}, MD, \{\Phi M_m\}, ЦФ, \{ОР\} \end{array} \right\} \right\rangle = MP_{li}^3,$$

где S_D – размерные связи поверхностей детали.

Процедура получения образа:

$$\{OP_i\}^П \times \{OP_i\} \times MP_{li}^3 \rightarrow O_{li}^3.$$

$$O_{li}^3 = \left\langle \left\{ \begin{array}{l} \{TD_l\}, S = \cup S_D, \{Z_i\}, \{СПЗ_i\}, \{\Delta ШП_{jm}\}, \{MD\}, \{\Phi M_m\}, \{\Delta N\}, \{ОП_j\}, \{\Delta ТР_{jm}\}, \{ОР\}, \{ЦФ\}, \{HD\} \end{array} \right\} \right\rangle.$$

Параметры режимов резания определяются признаками MP_{li}^4 :

$$PP_i \leftrightarrow \left\langle \left\{ \begin{array}{l} ВП_i, Z_i, СПЗ_i, \{РП_j\}_i, \{ТР_j\}_i, ШП_i, \{ОП_j\}, HD, \Phi M, MD \end{array} \right\} \right\rangle = MP_{li}^4;$$

$$\{PP_i\}^П \times \{PP_i\} \times \{M_1^4\} \rightarrow \{O_1^4\};$$

$$O_{li}^4 = \left\langle \left\{ \begin{array}{l} ВП_i, Z_i, СПЗ_i, \{\Delta РП_j\}_i, \{\Delta ТР_j\}_i, \Delta ШП_i, \{ОП_j\}, HD, \Phi M, MD \end{array} \right\} \right\rangle.$$

Управляющие программы определяются признаками MP_2^4 :

$$UP_i \leftrightarrow \left\langle \left\{ \begin{array}{l} TD_l, S_D^П, S'_D, \{ОП_j\}, \{ТР_{jm}\}, \\ \{ШП_m\}, MD, \{\Phi M_m\}, S_B, \{РП_i\} \end{array} \right\} \right\rangle = MP_{2i}^4,$$

где $S_D^П$ – размерные связи детали, соответствующие состоянию после обработки; S'_D – те же самые, но до обработки; S_B – временная структура выполнения переходов в ОП. Для быстрого поиска программ с целью их корректировки достаточно $TD_l, S_D^П, S'_D$.

Обобщение опыта (корректировка УП) выполняется по результатам их обработки в ТП:

$$\{UP_i\}^П \times \{UP_i\} \times \{M_2^4\} \rightarrow \{O_4^2\}; \quad O_2^4 = \left\langle \left\{ \begin{array}{l} TD_l, S'_D, S_D^П, \{HD\} \end{array} \right\} \right\rangle.$$

Добавляя оставшиеся неучтенные признаки, можно получать соответствующие подмножества образа O_2^4 .

На этом уровне следует выполнять *ОБ* данных по фактическим затратам времени на выполнении операции в двух направлениях.

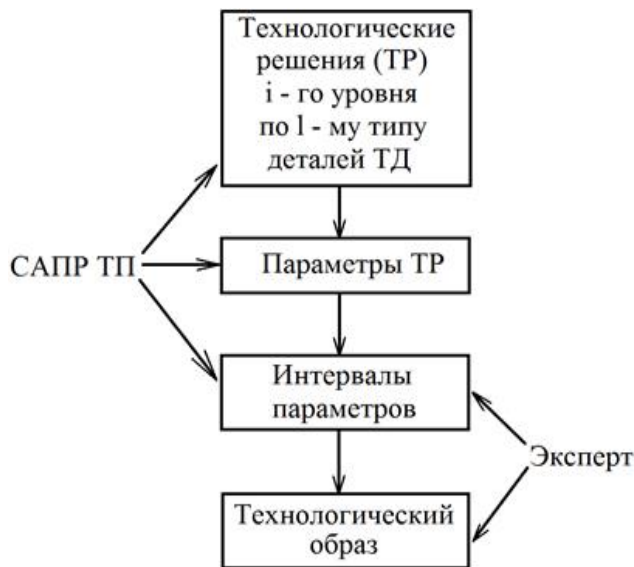
Первое: определение, сравнение и корректировка времени на выполнение конкретной операции в целом:

$$T_{шткi}^P \times \{T_{шткi}^\Phi\} \rightarrow T_{штк}^Y,$$

где $T_{шткi}$ – штучно-калькуляционное время выполнения i -й операции конкретной детали; индекс p, ϕ, y – расчетное, фактическое, уточненное значение. Второе: анализ затрат времени и их уточнение на выполнение множества элементов различных операций, характеризуемых параметрами:

$$\{Z_j\}: \{T_{шткi}^P\} \times \{T_{шткi}^\Phi\} \times \{Z_i\} \rightarrow t_j^Y,$$

где t_j^Y – множество уточненных составляющих штучно-калькуляционного времени, соответствующих множеству элементов операций Z_j . На основе образов обеспечивается проектирование по методу типизации на всех уровнях, вплоть до полных аналогов.



Модель накопления и обобщения информации

Модель накопления и обобщения информации в базах знаний приведена на рисунке. Запоминаются технологическое решение (информационная модель ТПр i -го уровня) и перечисленные выше определяющие его признаки (параметры). Решения группируются по конструктивно-технологически сходным деталям, определяются и оцениваются интервалы признаков.

Решение и интервалы признаков (параметров) заносятся в базу знаний, в дальнейшем технологическое решение любого уровня выбирается сравнением

значений признаков детали с интервалами значений признаков в базе знаний. САПР ТП выполняет накопление и определение интервалов параметров, оценка и обобщение осуществляются с участием экспертов.

Заключение. Представленная модель накопления и обобщения информации позволяет построить САПР ТП с элементами ИИ, которая позволит сократить время ТПП. Обобщение и накопление знаний должны выполняться при активном участии экспертов и с учетом результатов от-

работки ТПр в технологическом подразделении. Реализация предлагаемой САПР ТП с РБЗ может осуществляться в программной среде известных отечественных САПР ТП. Использование данной САПР ТП с РБЗ позволяет предприятию добиться успеха на рынке и получить преимущество перед конкурентами-производителями при сокращении сроков ТПП, снижении трудоемкости производства на стадии его подготовки.

Библиографический список

1. Бурдо, Г.Б. Повышение эффективности управления технологическими подразделениями в условиях единичного и мелкосерийного производств / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх // Вестник Донского государственного технического университета. 2009. Т. 9. № 4. С. 659-666.
2. Бурдо, Г.Б. Программные средства имитационного моделирования размерной структуры технологических процессов / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, Г.И. Рагозин // Программные продукты и системы. 2010. № 1(89). С. 82-85.
3. Бурдо, Г.Б. Автоматизация технологической подготовки многономенклатурного производства / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, Н.В. Испирян, А.А. Исаев А.А., В.Г. Бурдо // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2013. Вып. 6. С. 106-110.
4. Евгениев, Г.Б. Системология инженерных знаний: учеб. пособие для вузов / Г.Б. Евгениев. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 376 с.
5. Поздеев, Б.М. Управление знаниями и интеллектуальная поддержка принятия решений на этапах проектирования и производства машиностроительных изделий: тр. IX-й национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2004 / Б.М. Поздеев. М.: Физматлит. Т. 3. С. 1039-1050.
6. Яблочников, Е.И. Организация единого информационного пространства технической подготовки производства с использованием PDM SmarTeam / Е.И. Яблочников // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. № 3. С. 22-29.
7. Обухов, И.А. Автоматизация систем управления предприятиями стандарта ERP-MRP-11 / И.А. Обухов, Б.Н. Гайфуллин. Интерфейс-Пресс, 2002. 286 с.
5. Корсаков, В.С. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / В.С. Корсаков, Н.М. Капустин, К.Х. Темпельхов [и др.]. М.: Машиностроение, 1986. 204 с.
9. Кондаков, А.И. САПР технологических процессов / А.И. Кондаков. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.

УДК 621.311:658.26

Г.Б. Бурдо, А.Ю. Сорокин
Тверской государственный технический университет

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Изложены принципы выбора критериев оценки качества изделия в автоматизированной системе управления качеством. Представлен комплекс критериев оценки качества, разработанный на основе данных принципов.

Ключевые слова: система управления качеством, критерии оценки качества изделия, принципы выбора критериев.

CRITERIA FOR PRODUCT QUALITY ASSESSMENT IN THE AUTOMATED QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

The principles of the selection of criteria for product quality assessment in the automated quality management system are reported. A set of criteria for the quality assessment developed on the basis of these principles has been presented.

Keywords: quality management system, quality assessment criteria, criteria selection principles.

Качество продукции является важнейшим фактором, влияющим на конкурентоспособность предприятия. Поэтому с целью управления качеством продукции на всех этапах жизненного цикла изделия необходимо создавать *систему управления качеством* (СУК) продукции, функционирование которой определяется стандартами серии ИСО 9000 [1]. Ранее для достижения желаемого уровня качества продукции было достаточно контролировать его на отдельных этапах *жизненного цикла изделия* (ЖЦИ). В настоящее время для обеспечения качества продукции необходимо управлять качеством [2] на каждом этапе и стадии ЖЦИ (рис. 1).

Общие принципы выбора критериев оценки качества. Для управления качеством изделия необходимы данные о состоянии качества продукции на протяжении всего ЖЦИ. Такими данными выступают *критерии оценки качества изделия*. Важным становится рациональный выбор критериев, случайный подбор критериев может привести к необоснованным решениям. Следует помнить, что каждый критерий будет служить не только основой оценки, но и в качестве базы для выработки управляющих воздействий на проектно-конструкторскую и производственную деятельность. Вследствие этого подбор критериев должен основываться на принципах, полученных на основе анализа деятельности исполнителей на этапах ЖЦИ [1, 3, 4, 5]:

1. Комплекс критериев качества должен соответствовать принципам серии стандартов ИСО 9000.

Комплекс критериев качества продукции является частью всей системы управления качеством предприятия, следовательно, как и СУК, комплекс критериев должен соответствовать целям серии стандартов ИСО 9000 (преемственность систем).

2. Иерархическая структура критериев качества должна соответствовать иерархии СУК (исходя из принципа наследственности производных систем).

При несоответствии структуры критериев качества структуре СУК возникает отделение комплекса критериев качества от СУК, становится непонятно, где какие критерии применяются. В данном случае была рассмотрена СУК с иерархической структурой, поэтому и структура критериев качества носит иерархический характер (рис. 2).

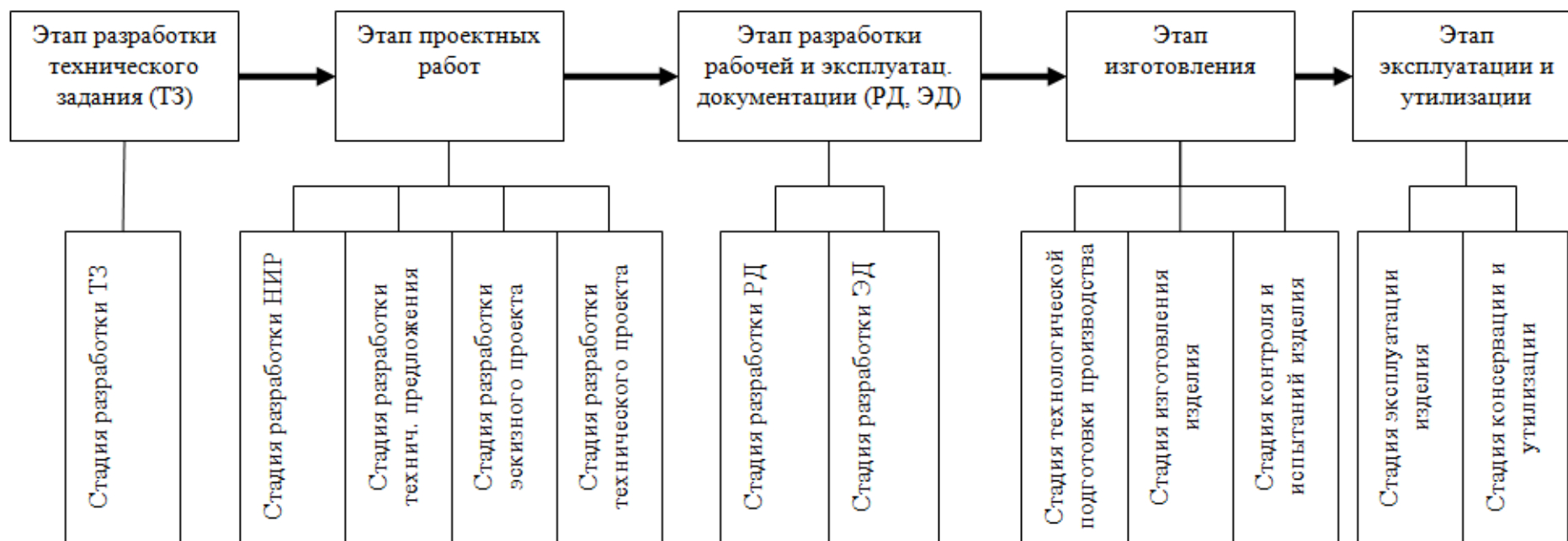


Рис. 1. Основные этапы и стадии ЖЦИ

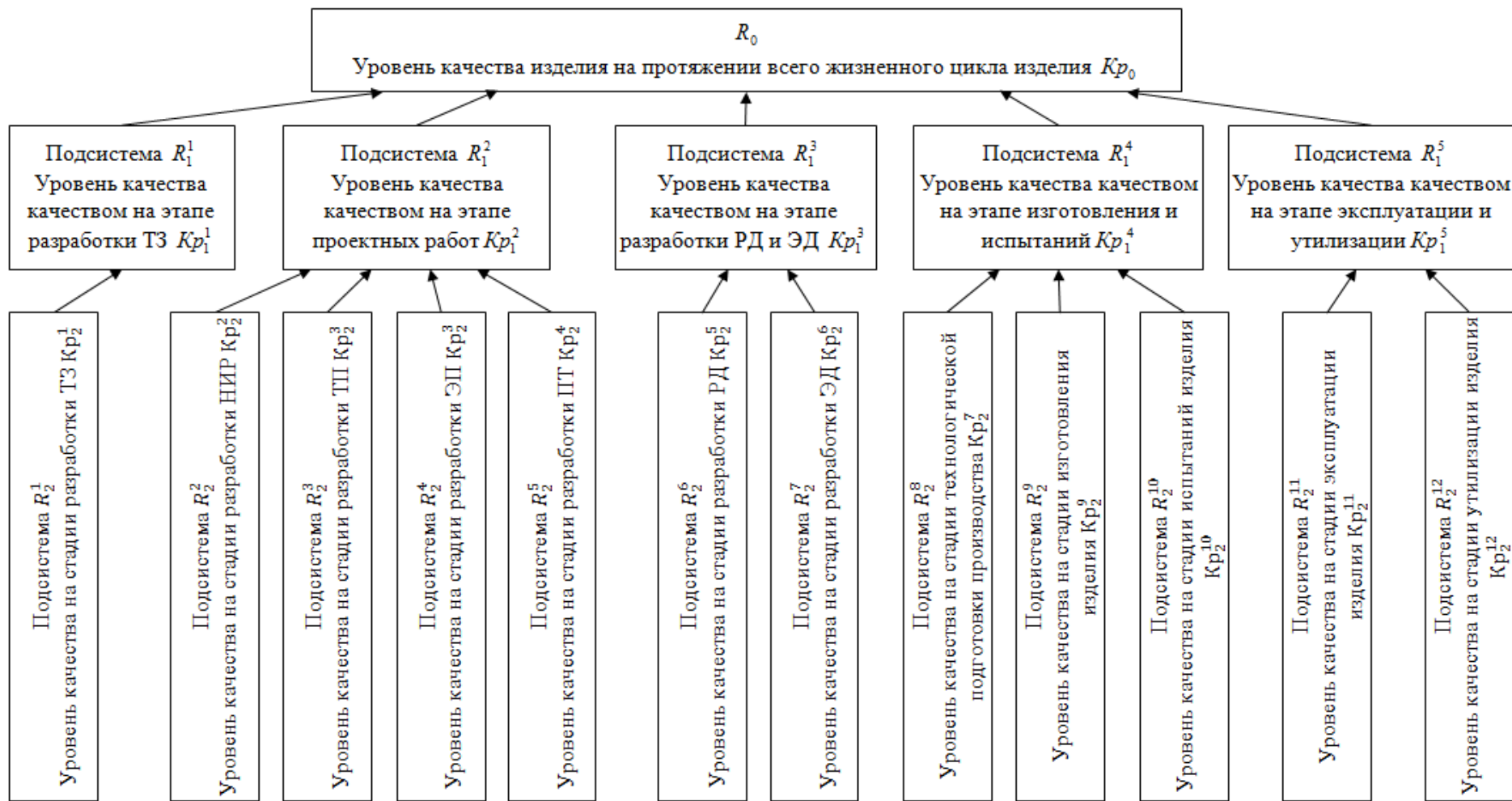


Рис. 2. Иерархическая структура критериев качества изделия

3. Комплекс критериев должен быть понятным каждому пользователю СУК.

Работнику предприятия должно быть понятно, какой именно результат работы от него ожидают, поэтому должна соблюдаться определенная терминология.

4. Комплекс критериев должен давать возможность однозначного обоснования и понимания.

Недопустимо, чтобы критерии качества каждый работник предприятия понимал и применял по-своему, поэтому не должно быть избыточности информации.

5. Комплекс критериев должен быть адекватным оцениваемой технической системе и непротиворечивым.

Система измерения критерия должна соответствовать системе измерения показателей изделия (например: при оценке скорости изделия в км/ч критерий должен измеряться в км/ч, а не м/с). Критерии на всех этапах ЖЦИ и уровнях должны быть логически увязаны.

6. Количество критериев должно быть минимальным и достаточным для объективной оценки качества изделия СУК предприятия.

Количество критериев не должно быть избыточным, большое количество критериев приведет к перегрузке ресурсов СУК. Более того, при использовании незначительных критериев возникает риск недооценить влияние наиболее важных критериев.

7. Комплексность критериев.

Качество изделия следует оценивать в комплексе, т.е. с позиции не только данного этапа ЖЦИ, но и последующих этапов. Таким образом обеспечивается перекрытие во времени работ, выполняемых на ранних этапах ЖЦИ.

8. Измеримость критериев.

Для оценивания качества показатели изделия необходимо измерять. Измерения показателей изделия будут носить как качественный, так и количественный характер.

9. Детализация критериев.

При переходе на последующие стадии ЖЦИ критерии должны детализовываться, качественные критерии заменяться количественными.

Комплекс критериев оценки качества изделия. На основе представленных принципов была построена модель критериев качества изделия. В подсистеме управления качеством изделия на протяжении всего ЖЦИ (R_0) имеются 5 глобальных критериев качества, на основе которых оценивается общее (конечное) качество изделия:

1. Критерием Kp_1 оценивается уровень качества на этапе разработки технического задания (ТЗ).

2. Критерием Kp_2 оценивается уровень качества на этапе проектных работ.

3. Критерием Kp_3 оценивается уровень качества на этапе разработки рабочей документации (РД) и эксплуатационной документации (ЭД).

4. Критерием Kp_4 оценивается уровень качества на этапе изготовления и испытания.

5. Критерием Kp_5 оценивается уровень качества на этапе эксплуатации и утилизации.

Представленные глобальные критерии носят качественный характер, характеризуя конечное множество частных критериев. Для них установлена шкала оценок: 1) недостаточное качество; 2) достаточное качество; 3) хорошее качество.

Наиболее важным этапом, влияющим на качество изделия, является этап проектных работ, результаты которого станут основой для всех последующих этапов ЖЦИ. Поэтому рассмотрим критерии качества на этом этапе.

Подсистемы 1-го уровня (R_1^n), оценивающие качество изделия на соответствующем этапе ЖЦИ, имеют соответствующие этапу критерии качества изделия. Например, в подсистеме управления качеством проектных работ (R_1^2) установлены частные критерии:

1. Критерием Kp_2^2 оценивается уровень качества на стадии проведения НИР.

2. Критерием Kp_2^3 оценивается уровень качества на стадии разработки технического предложения (ТП).

3. Критерием Kp_2^4 оценивается уровень качества на стадии разработки эскизного проекта (ЭП).

4. Критерием Kp_2^5 оценивается уровень качества на стадии разработки технического проекта (ПТ).

Наконец, подсистемы 2-го уровня (R_2^n), оценивающие качество изделия на соответствующей стадии ЖЦИ имеют соответствующие стадии критерии качества изделия. Например, в подсистеме управления качеством на стадии разработки ЭП (R_2^4) установлены частные критерии (рис. 3).

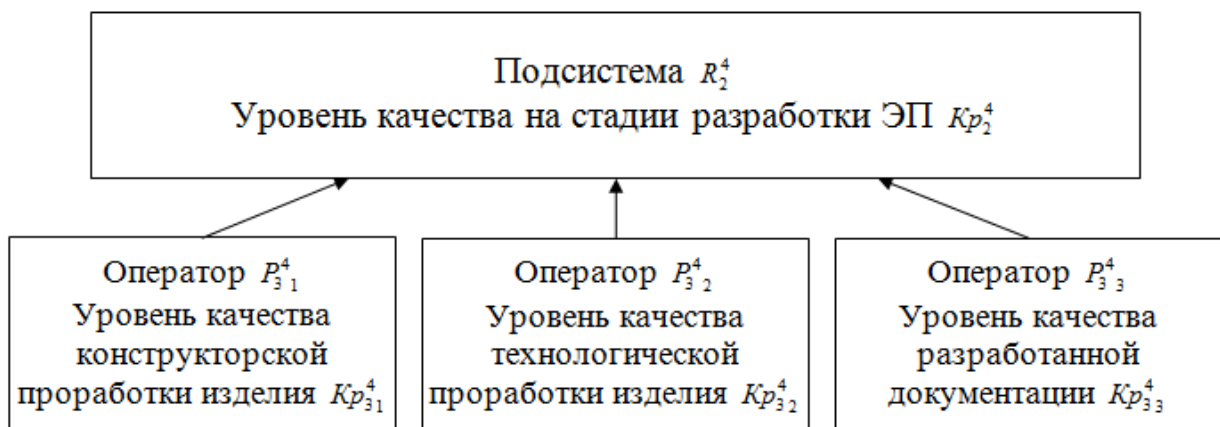


Рис. 3. Модель системы критериев качества на стадии разработки ЭП

1. Критерием $Kp_{2_1}^4$ оценивается уровень качества конструкторской проработки изделия, разработанного на стадии ЭП.

2. Критерием $Kp_{2_2}^4$ оценивается уровень качества технологической проработки изделия, разработанной на стадии ЭП, т.е. захватывает следующие этапы ЖЦИ.

3. Критерием $Kp_{2_3}^4$ оценивается уровень качества документации, разработанной на стадии ЭП.

Подобное разделение позволяет отдельно оценить как качество самой документации, разработанной на данной стадии, так и качество изделия, т.е. информацию, содержащуюся в документации.

Последним 3-м уровнем СУК являются операторы $\{ P_{3_m}^n \}$, оценивающие результаты работ на стадиях ЖЦИ, которые сгруппированы и формализованы с целью повышения эффективности и удобства работы. Например, оператор, оценивающий качество конструкторской проработки изделия, разработанного на стадии ЭП ($P_{3_1}^4$), оценивает всю информацию, относящуюся к конструкции изделия на стадии ЭП. Оценка качества выполняется на основе множества частных критериев оценки качества изделия $Kp_{3_1}^4 = [K_1(P_{3_1}^4), K_2(P_{3_1}^4), K_3(P_{3_1}^4), K_4(P_{3_1}^4), K_5(P_{3_1}^4)]$.

1. Критерием $K_1(P_{3_1}^4)$ оценивается степень соответствия параметров изделия (технические характеристики и технико-экономические показатели) требованиям ТЗ и ТП, устанавливается 3-балльная шкала: 1) не соответствуют; 2) соответствуют только ключевые (основные) показатели изделия; 3) все показатели изделия соответствуют требованиям ТЗ и ТП.

2. Критерием $K_2(P_{3_1}^4)$ оцениваются показатели работоспособности и надежности конструкции изделия, устанавливается 3-балльная шкала: 1) конструкция изделия неработоспособна и/или ненадежна; 2) конструкция изделия работоспособна и в целом надежна; 3) конструкция изделия работоспособна и надежна.

3. Критерием $K_3(P_{3_1}^4)$ оценивается соответствие изделия требованиям техники безопасности и экологичности, устанавливается 2-балльная шкала: 1) не соответствует; 2) соответствует.

4. Критерием $K_4(P_{3_1}^4)$ оцениваются показатели эргономичности изделия, устанавливается 2-балльная шкала: 1) недостаточно эргономично; 2) достаточно эргономично.

5. Критерием $K_5(P_{3_1}^4)$ оценивается удобство эксплуатации изделия (т.е. качество на последующих этапах ЖЦИ), устанавливается 3-балльная шкала: 1) неудобно (не соответствует требованиям эргономичности); 2) в целом удобно; 3) достаточно удобно.

На основании анализа качественных и количественных значений частных критериев выполняется комплексная оценка качества изделия. Разработана база правил для производственных моделей знаний, вырабаты-

вающая директивные указания. На основе указаний осуществляется возврат на предыдущую стадию ЖЦИ (итерация) при ненадлежащем качестве изделия либо переход на последующую (безусловный или с замечаниями об учете недостатков на следующей стадии).

Заключение. Представленная иерархическая модель критериев оценки качества изделия позволяет комплексно охватить все этапы и стадии ЖЦИ и оценить состояние разработок на них. По нашему мнению, ее внедрение позволяет обеспечить качество изделия и целенаправленно построить работу проектировщиков.

Библиографический список

1. Гличев, А.В. Основы управления качеством продукции / А.В. Гличев. М.: РИА «Стандарты и качество», 2001. 424 с.
2. Колчин, А.Ф. Управление жизненным циклом продукции / А.Ф. Колчин, М.В. Овсянников, А.Ф. Стрекалов, С.В. Сумарков. М.: Анархист, 2002. 304 с.
3. ГОСТ 2.103-68. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки.
4. ГОСТ 3.1102-81. Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документации.
5. Дитрих, Я. Проектирование и конструирование: Системный подход / Я. Дитрих. М.: Мир, 1981. 456 с.

УДК 658.512.624

Г.Б. Бурдо, Н.А. Семенов, И.С. Конькова, А.В. Федотова
Тверской государственный технический университет

УПРАВЛЕНИЕ РАБОТОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ СО СТАЦИОНАРНЫМИ ОБСЛУЖИВАЕМЫМИ ОБЪЕКТАМИ В АСУТП

В статье показаны особенности подходов, реализуемых при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами сборки и технического обслуживания высокотехнологичных изделий. Приведены алгоритмы работы основных подсистем АСУТП, дана постановка задачи составления расписания работы участка.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления технологическими процессами, оперативное планирование, календарные планы-графики, технологический процесс, сборка, техническое обслуживание.

MANAGEMENT OF THE TECHNOLOGICAL UNITS WITH STATIONARY CLIENT SITES IN DCS

The article describes the peculiarities of approaches implemented with the creation of automated control systems of technological processes of the assembly and maintenance of high-tech products. There are algorithms of work of the basic subsystems of automated control systems, the setting of the task to schedule the operation of the section is given.

Keywords: the automated control systems of technological processes, operational planning, calendar schedules, technological process, assembly, maintenance.

В современном машиностроении (в его множестве отраслей) появилось достаточно большое количество предприятий и фирм, занимающихся выполнением технологических процессов, обеспечивающих изготовление и обслуживание высокотехнологичной продукции. Учитывая небольшие объемы изделий одного наименования, предприятия можно отнести к мелкосерийному и единичному типу производств. Такие технологические процессы (ТП) как сборка изделий, техническое обслуживание, ремонт выполняются в основном при стационарном положении обслуживаемого объекта (ОО). Эти факты заставляют пересмотреть и уточнить некоторые алгоритмы функционирования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП).

Алгоритмы работы подсистем объемного и календарного планирования. В соответствии с принятыми на практике принципами планирования первоначально определяют объемный (ОП) (годовой, квартальный) и календарные (КП, как правило, месячные) планы работы подразделений, выполняющих ТП. Планы формируются на основании разработанных ТП. Эти действия вполне укладываются в рамки процессов ЕАМ [1, 2], единственное, что нуждается в уточнении, это понятие мощностей и критерии окончания формирования планов. В отличие от других типов производств, где мощности подобных производств оцениваются в площадях, в нашем случае оценку следует выполнять в трудоемкостях.

Для ОП должны выполняться следующие условия окончания их формирования. Первое условие:

$$\frac{\sum^M (\sum (\sum T_{ij})_m)}{K_2} \leq K_1 \cdot \sum_1^N \Phi_n,$$

где Φ_n – фонд (годовой, квартальный) времени работы 1-й бригады работников; $n = \overline{1, N}$, N – количество бригад; T_{ij} – трудоемкость j -й работы в i -й процедуре для объекта m ; $m = \overline{1, M}$ – количество ОО за год (или квартал); $K_1 = 0,9 \div 0,95$ – коэффициент, учитывающий необходимость наличия локальных резервов в планах; $K_2 = 1,2 \dots 1,3$ – коэффициент, учитывающий параллельное выполнение операций (работ) над ОО во времени (по данным опыта фирмы).

Второе условие (для каждого вида операций или работ, имеющих в ТП, l):

$$\frac{(\sum (\sum T_{il})_n)^l}{K_2} \leq K_1 \cdot \sum \Phi_n^l,$$

где $(\sum(\sum T_i)_n)^l$ – суммарная трудоемкость работ вида l за год (квартал); $\sum \Phi_n^l$ – суммарный фонд времени рабочих, выполняющих ТО по виду работ l за год (квартал).

Для календарных (месячных) планов работ формулы имеют аналогичный вид, но коэффициент K_1 принимается равным $0,85 \dots 0,9$ с целью учета разницы величины суммарной трудоемкости работ (операций) и цикла обслуживания; цикл больше суммарной трудоемкости на величину перерывов между операциями, вызванных разными причинами. Фонды времени работы рабочих (бригад) и трудоемкости работ приводят к месяцу.

Алгоритмы построения календарных планов-графиков и диспетчирования работы подразделений. Постановка задачи для стационарных ОО требует существенного уточнения. Синтезированные варианты ТП и КП могут явиться основой для оперативного планирования (ОП) и управления работой технологического подразделения, выполняющего, скажем, сборку или техническое обслуживание. Реализация указанного мероприятия позволит обеспечить «интеллектуализацию» принятия решений в имеющихся системах ЕАМ. С этой целью покажем формальную постановку задачи составления календарного плана-графика (расписания) работы подразделения (П), в котором выполняются оговоренные работы. Постановка сделана на основе теории расписаний и анализа работ [1–10].

Календарные планы-графики (КПГ) разрабатываются на интервалы оперативного планирования (ИОП), равные 3–5 календарным дням. Величина ИОП определяется способом и уровнем управления подразделениями ТО. Чем выше уровень (качество) управления, тем меньше величина ИОП:

1. Задано подразделение, выполняющее обслуживание, с установившимся режимом работы. В подразделении должно быть выполнено обслуживание некоторого множества объектов $O = \{O_i\}, i = \overline{1, d}$; d – количество обслуживаемых объектов.

2. По каждому из объектов должна быть выполнен ТП сборки (или процедура) обслуживания $ТП_i, i = \overline{1, d}$.

3. Каждый технологический процесс $ТП_i$ состоит из множества операций (работ) $W_i = \{W_{ij}\}, i = \overline{1, d}; j = \overline{1, k^i}$, где k^i – количество операций (работ) в i -ом ТП (процедуре); $l = \overline{1, g}$, где g – количество (множество) групп работ, в каждую группу входят однотипные работы (операции), в частном случае может быть $g = 1$.

4. Каждая операция (работа) ω_{ij} характеризуется трудоемкостью ее выполнения $T_{ij} = T_{ij}^{on} + T_{ij}^{don}$, T_{ij}^{on} – непосредственное время выполнения операции, T_{ij}^{don} – время на подготовку к операции и переход на рабочее место.

5. Операции выполняются R бригадами рабочих (рабочими), $R = \{r_m\}, m = \overline{1, c}$, где c – количество бригад.

6. Каждая бригада r_m выполняет работы по определенным группам: $W_m^r = \{\omega_{mm}^r\}$, где $m = \overline{1, c}; n = \overline{1, g^r}$, где g^r – количество (множество) групп работ, выполняемых бригадой, в частном случае может быть $g^r = 1$.

7. Для обеспечения выполнимости работ $\{\omega_{ijl}\}$ должно быть выдержано условие, означающее, что все группы планируемых работ могут быть выполнены исполнителями:

$$[G = \cup(1, 2, \dots, g)] \subset G^r = \cup(1, 2, \dots, g^r).$$

8. Порядок следования операций (работ) $\{\omega_{ijl}\}$ в ТП (процедуре) $ТП_i$ может быть произвольный или фиксированный. Часть работ может выполняться параллельно во времени. Ограничения на формируемый календарный план-график (КПГ):

1. Непрерывность восполнения работы над объектом. Для этой цели времена начала t_{ijl}^o и окончания t_{ijl}^k работы $\{\omega_{ijl}\}$ связываются соотношением

$$t_{ij}^k = t_{ij}^o + T_{ij}.$$

2. Невозможность параллельного выполнения на одном объекте некоторых работ, т.е. для них условие

$$t_{i'j'}^o \leq t_{ij}^o \leq t_{ij}^k,$$

где индексы $i''j''$ и $i'j'$ соответствуют несовместимым работам. Это новое ограничение по сравнению с известными.

С этой целью строится матрица совместимости (параллельного по времени) выполнения работ на основании удобства и возможности технического обслуживания объекта, аналогично выполненной ранее.

3. Невозможность проведения одновременного числа работ большего, чем число бригад, т.е. для множества работ $\{\omega_{ijl}\} = \{\omega_{ij} \dots \omega_{ij}\}$ условие $t_{ij}^o \leq t_{ij}^o \leq t_{ij}^k$ не может выполняться более c раз (c – число бригад). Это новое ограничение.

4. Невозможность одновременного проведения работ одинаковых групп большего, чем число специализированных для этих групп бригад. Для учета этого ограничения введем переменную:

$$x_{ijl} = \begin{cases} 1, & \text{если группа работ } \omega_{ijl} \text{ совпадает с группой работ } \omega_{mn}^r, \text{ т.е. } n = l. \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

В любой момент времени $t_{ij}^o \leq t \leq t_{ij}^k$ работы подразделения $\sum x_{ijl} \leq B$, где B – число бригад, могущих выполнять работу группы n .

5. Если последовательность операций в ТП оговорена, то порядок не может быть нарушен.

6. Учитывая, что, как правило, реальная производственная ситуация, складывающаяся в подразделении, не всегда формальна и динамична,

предлагается ввести ряд ограничений – приоритетов. Они отражают текущее состояние подразделений и директивы управленческого персонала.

Над объектом с более высоким приоритетом первой выполняется операция освободившейся бригадой, обеспечивающей выполнение операции (работы) из оставшихся в ТП объекта, т.е. $t_{ijl}^o \leq t_{i'jl}^o$, если приоритет объекта i выше приоритета объекта i' . Это новое ограничение по сравнению с известными постановками.

Применение приоритетов во многом упрощает алгоритмы построения КПП.

Требуется построить КПП $= \{t_{ijl}^o\}$, отвечающий перечисленным ограничениям. В качестве целевой функции выступает общий минимальный цикл технического обслуживания всех объектов, T_o :

$$T_o = \max_{ijl} \{t_{ijl}^k\} \rightarrow \min .$$

Приоритеты, применяемые при разработке КПП. В качестве правил, определяющих приоритеты обслуживаемых объектов, могут быть следующие:

1. Установление приоритетов объектов руководителем подразделения. Каждому ОО присваивается ранг, скажем, цифрами от 1 до d , где d – общее число ОО.

Для получения вариантов ветвлений КПП и учитывая, что на ОО может быть выполнено одной и той же бригадой несколько работ, следует в одном варианте предусмотреть выполнение операции максимальной трудоемкости, а во 2-ом – минимальной.

2. Установление приоритетов нескольким объектам, остальные имеют приоритеты ниже. Среди них приоритеты могут быть установлены следующим образом. Целесообразно предусмотреть два варианта, определяющие возможные ветвления вариантов КПП:

А. Первым освободившейся бригадой обслуживается объект с минимальной остаточной суммарной трудоемкостью, т.е. этот объект имеет максимальный приоритет. Этот приоритет исходит из посыла, что лучше быстрее закончить обслуживание тех объектов, которые имеют меньший объем выполняемых работ, и передать его далее.

Б. Второй приоритет имеет противоположный смысл, чтобы охватить две крайние ситуации. Его смысл – выровнять объемы проведенных операций по всем ОО:

1. Первым освободившейся бригадой выполняется обслуживание объекта с максимальной остаточной суммарной трудоемкостью операций.

2. Если приоритетные обслуживания не назначаются руководством подразделения, то для всех объектов приоритеты устанавливаются согласно п. 2А и 2Б.

Таким образом, генерация КПП будет выполняться с использованием приоритетных схем, на основе аналитико-приоритетного метода с использованием пошаговых процедур (имитации) прохождения операций ТП объектами [9, 10].

Диспетчирование работ осуществляется путем контроля за ходом технического обслуживания, сравнением плановых и фактических времен окончания операций. При этом должны анализироваться: 1) отставания (опережения) выполнения КПП; 2) тенденция изменения отставания (опережения) КПП; 3) фактические и действительные фонды времени обслуживающих рабочих (бригад); 4) нормы времени на выполнение операций обслуживания; 5) коэффициент параллельного по времени выполнения операций.

Заключение. Указанный подход определяет направления интеллектуального совершенствования существующих оболочек класса *MRP*. Очевидно, что развитием данной работы должно явиться создание формальных правил осуществления процедур поиска решений на каждом этапе планирования и диспетчирования.

Библиографический список

1. Бурдо, Г.Б. Интеллектуальные процедуры планирования и управления в производственных системах геофизического приборостроения / Г.Б. Бурдо // Программные продукты и системы. 2011. № 3(95). С. 107-110.
2. Бурдо, Г.Б. Оперативное планирование на основе приоритетных схем в производственных системах геофизического приборостроения / Г.Б. Бурдо // Каротажник. 2011. № 6(204). С. 92-100.
3. Semakula, M.E. The role of process planning in the integration of CAD/CAM systems / M.E. Semakula // Automated Manufacturing. 1987. P. 269-276.
4. Прилуцкий, М.Х. Многокритериальные многоиндексные задачи объемно-календарного планирования / М.Х. Прилуцкий // Известия АН. Теория и системы управления. 2007. № 1. С.78-82.
5. Прилуцкий, М.Х. Метод декомпозиции для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов / М.Х. Прилуцкий, Д.И. Батищев, Э.Д. Гудман, И.П. Норенков // Информационные технологии. 1997. № 1. С. 29-33.
6. Прилуцкий, М.Х. Метод ветвей и границ с эвристическими оценками для конвейерной задачи теории расписаний / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2008. № 3. С. 143-157.
7. Смоляр, Л.И. Модели оперативного планирования в дискретном производстве / Л.И. Смоляр. М.: Наука, 1988. 320 с.
8. Султан-заде, Н.М. Повышение производительности ГПС путем оптимизации расписаний / Н.М. Султан-заде, Р.Р. Загидуллин. М.: СТИН, 1996. № 12. С. 9-13.
9. Танаев, В.С. Введение в теорию расписаний / В.С. Танаев, В.В. Шкурба. М.: Наука, 1975. 256 с.
10. Коффман, Э. Теория расписания и вычислительные машины / под ред. Э. Коффмана. М.: Наука, 1984. 534 с.

УДК 621.311:658.26

Г.Б. Бурдо, А.А. Исаев, В.Г. Бурдо
Тверской государственной технической университет,
Р.З. Диланян
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

СОГЛАСОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ В МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Приводится анализ условий проведения технологической подготовки производства изделий с позиций концепции организационно-технологического проектирования. Показана теоретико-множественная модель производственной системы, позволяющая корректно определить целевую функцию при проектировании технологического процесса механической обработки.

Ключевые слова: Система автоматизированного проектирования технологических процессов, искусственный интеллект, целевая функция, единое информационное пространство

COORDINATED FORMATION OF THE TARGET FUNCTION AT PREPRODUCTION ENGINEERING IN MULTIPRODUCT MANUFACTURING

The analysis of conditions of preproduction engineering with the positions of the concept of organizational and technological design is presented. The set-theoretical model of production system is presented. This model permits to identify correctly the target function when designing technological process of machining.

Keywords: System of automated design of technological processes, artificial intelligence, target function, a single information space

подавляющее большинство научно-производственных фирм машиностроительного профиля, занимающихся выпуском наукоемкой продукции, можно обоснованно отнести к предприятиям единичного и мелкосерийного производства. Особенности единичного и мелкосерийного производства (многономенклатурного производства, МП), обусловленные сжатыми сроками на выполнение одновременно большого числа контрактов, определяют упрощенное проведение технологической подготовки производства (ТПП). Как правило, не указывается и целевая функция конкретного заказа – партии изделий, выполняемых по одному комплекту конструкторской документации, что определяет неопределенные технико-экономические показатели технологических процессов (ТПр). Поэтому качество спроектированных ТПр, определяющих конкурентоспособность продукции наряду с конструкцией изделий, оставляют желать лучшего.

Следовательно, для динамических производственных систем (ПС) МП важно разрешить противоречие между качеством ТПр и весьма ограниченными временными периодами их разработки [1–4].

Учет динамики производственной ситуации при проектировании технологических процессов. Одним из наиболее эффективных методов разрешения указанного противоречия является разработка и внедрение автоматизированных систем проектирования технологических процессов (САПР ТП), построенных на определенных принципах [1, 2].

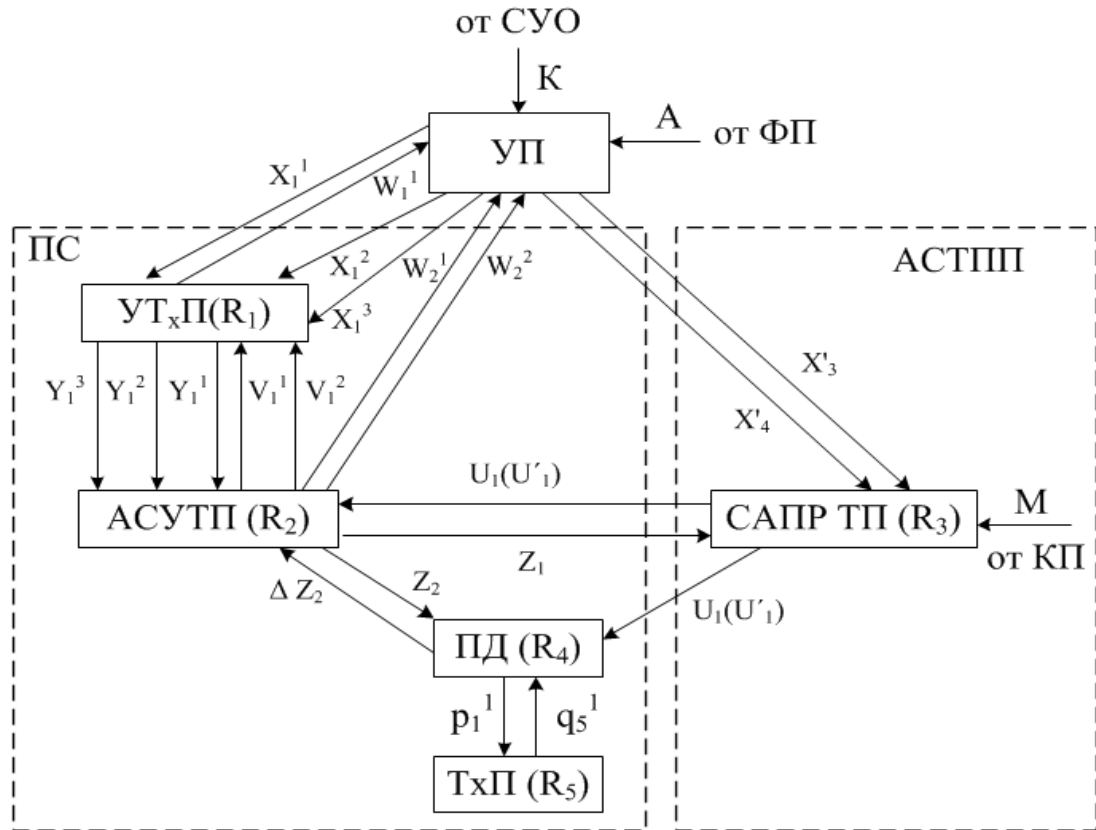
Основная идея подхода заключается в концептуальном моменте, что проектирование ТПр является мало формализованной, многовариантной *организационно-технологической* задачей, решаемой в условиях информационной неопределенности [2, 3].

Так как постоянно происходит изменение производственной ситуации и ситуации в системе управления фирмой (загрузка оборудования, сроки окончания контракта или его части, финансовые показатели, время выполнения части работ сторонними организациями) [2, 4], то вполне логичным будет представляться и необходимость корректировки целевой функции (ЦФ) конкретного заказа. Авторы [5–8] считают, что ЦФ должна являться минимальная технологическая себестоимость C_{\min} . Точка зрения справедлива при устоявшейся номенклатуре выпуска, что нехарактерно для МП. Рассматриваются еще две ЦФ – максимальный выпуск изделий за единицу времени (Q_{\max}) и минимум времени цикла выпуска партии деталей (T_{\min}). Отмечается, что выбор Q_{\max} целесообразен в случае срочного выпуска изделий, а выбор целевой функции T_{\min} следует осуществлять в случае срочного выпуска изделий при многооперационных технологических процессах. ЦФ считается неизменной в течение достаточно длительного времени выполнения контракта (в контракте могут быть представлены заказы с разными календарными сроками исполнения), а понятие «срочность» и т.д. формально не определены. Следовательно, можно констатировать, что в рамках одного и того же контракта для разных заказов и с течением времени целевая функция может изменяться в соответствии с изменением производственной ситуации, т.е. необходимо управление ЦФ. Некорректное применение ЦФ приводит к неоправданным временным и (или) денежным издержкам в производстве. Поэтому, для исследования динамики информационных потоков и выявления процедур при управлении ЦФ технологического процесса заказа была разработана теоретико-множественная модель, отражающая взаимосвязи подразделений фирм при принятии решений о целевой функции.

Теоретико-множественная модель системы управления ЦФ. Теоретико-множественная модель системы управления ЦФ при проектировании технологических процессов механической обработки деталей, входящих в заказ, представлена на рисунке.

В модель входит управляющая подсистема УП (оператор R_0), операторы производственной системы (ПС) и автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП). ПС представлена операторами R_1 (управляющая подсистема технологическими подразделениями, УТхП),

R_2 (автоматизированная система управления технологическими процессами, АСУТП), R_4 (подсистема диспетчирования, ПД) и R_5 (технологические подразделения, ТхП). АСТПП представлена оператором R_3 система автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП).



Теоретико-множественная модель системы управления ЦФ

Оператор R_0 – человеко-машинная система, представляемая руководителем производственной системы со стороны дирекции фирмы. Оператор R_1 также человеко-машинная система, представляемая руководителем технологических (механообрабатывающих) подразделений. Операторы R_2 – R_5 автоматизированные системы, осуществляющие сбор информации (с активным участием человека) и ее автоматическую или автоматизированную переработку.

Управление целевой функцией следует осуществлять в ключевые моменты функционирования ПС и АСТПП – до начала проектирования (предварительное определение ЦФ) и непосредственно перед началом выполнения заказа (уточнение ЦФ). Это необходимо делать, учитывая, что временной интервал между проектированием ТПр и началом изготовления заказа может быть значительным по ряду причин (в связи с изменением очередности выполнения заказа, появлением новых срочных заказов и т.д.) и привести к изменению производственной ситуации либо был взят спроектированный ранее для предыдущих запусков ТПр. До начала изготовления заказа, по тем же са-

мым причинам, точное определение ЦФ в связи с увеличением числа процедур и их усложнением может привести к ненужным временным затратам.

Управление ЦФ до начала проектирования. Рассмотрим процедуры принятия решений операторами системы на начало проектирования ТПр (на время t_1).

Функции оператора R_0 – управляющей подсистемы, координирующей работу всей системы, следующие:

$$X_1^1(t_1) = W_1^1(\tau_1) \times A(\tau_{A1}) \times W_2^1(\tau_1), \quad (1)$$

где $X_1^1(t_1)$ – указание о целевой функции проектируемых ТПр конкретного заказа на время t_1 – начало их проектирования; $W_1^1(\tau_1)$ – оценка сроков выполнения заказа (достаточные, недостаточные) УТхП на время τ_1 , τ_1 функционально связано со временем t_1 ; $A(\tau_{A1})$ – оценка финансового состояния финансовой подсистемой (ФП) на время τ_{A1} , τ_{A1} функционально связано со временем t_1 ; $W_2^1(\tau_1)$ – множество параметров, укрупненно характеризующих загрузку оборудования (высокая, средняя, низкая) в ТхП на время τ_1^1 .

Функция $X_3^1(t_1)$ аналогична по смыслу функции $X_1^1(t_1)$, но имеет формальную математическую запись:

$$X_3^1(t_1) = X_1^1(t_1) \times N, \quad (2)$$

где N – формальные правила нормализации и приведения критериев.

Функция $X_1^2(t_1)$ определяет множество параметров, характеризующих состав заказов в контрактах и сроки их выполнения на момент времени τ_1 :

$$X_1^2(t_1) = K \times t_1, \quad (3)$$

где K – данные о всех контрактах и сроках их выполнения, получаемых от системы управления организацией (СУО); t_1 – временной интервал (до соответствующего времени).

Функция $X_1^3(t_1)$ – указание о приоритетности рассматриваемого заказа, $K \rightarrow X_1^3(t_1)$.

$X_4^1(\tau_1)$ эквивалентно по смыслу $X_1^2(\tau_1)$, но относится к САПР ТП и представляет множество параметров, характеризующих задание на проектирование ТПр до времени τ_1 .

$X_4^1(t_1)$ – задание на проектирование ТПр рассматриваемого заказа.

Функции УТхП.

$$W_1^1(\tau_1) = X_1^2(t_1) \times V_1^1(\tau_1) \times X_1^3(t_1), \quad (4)$$

где $X_1^2(t_1)$ – множество параметров, характеризующих состав заказов в контрактах и сроки их выполнения на момент времени t_1 ; $V_1^1(\tau_1)$ – множество параметров, характеризующих загрузку оборудования в ТхП на момент времени τ_1 .

Функция $Y_1^1(t_1)$ – синтез указания о приоритетности заказов при прохождении деталей по операциям при составлении календарных планов работы и календарных планов-графиков, запущенных на время t_1 .

$$Y_1^1(t_1) = X_1^3(t_1) \times ЧП,$$

где $ЧП$ – частные приоритеты УТхП.

Функция $Y_1^2(t_1)$ – сроки выполнения заказов, запущенных на время t_1 .

$$Y_1^2(t_1) = X_1^2(t_1) \times РВ,$$

где $РВ$ – резерв времени УТхП.

$$Y_1^3(\tau_{11}) = X_1^2(\tau_1) \times \tau_{11}.$$

$Y_1^3(\tau_{11})$ – множество параметров, синтезируемых УТхП и характеризующих задания на выполнение заказов на период времени τ_{11} , $Y_1^3(\tau_{11})$ по смыслу эквивалентно $X_1^2(\tau_1)$, но имеет другой отсчет времени, $\tau_{11} < \tau_1$ и связано со временем t_1 .

Функции АСУТП (оператор R_2):

$$W_2^1(\tau_1) = U_1(\tau_1) \times Y_1^2(\tau_1),$$

где $U_1(\tau_1)$ – множество параметров, характеризующих технологические процессы изготовления деталей заказов, спроектированные САПР ТП ко времени τ_1 ; $Y_1^2(\tau_1)$ – множество параметров, характеризующих сроки изготовления заказов, запущенных в обработку ко времени τ_1 .

Функция:

$$V_1^1(\tau_1) = U_1(\tau_{11}) \times Y_1^3(\tau_{11}) \times \Delta Z_2(\tau_1),$$

где $\Delta Z_2(\tau_1)$ – отклонение фактических календарных планов-графиков от плана.

Функция $Z_1(\tau_{11})$:

$$Z_1(\tau_{11}) = U_1(\tau_{11}) \times Y_1^3(\tau_{11}),$$

где $U_1(\tau_{11})$ – множество параметров, характеризующих времена выполнения операций в ТПр, выполняемых до времени τ_{11} .

Функция $Z_2(\tau_1)$ – формирование календарных планов графиков на время t_1 .

$$Z_2(\tau_1) = U_1'(\tau_{11}) \times Y_1^1(t_1) \times РВ,$$

где $РВ$ – резерв времени; $U_1'(\tau_{11})$ – последовательность и времена операций в маршрутах обработки деталей заказов.

Функция САПР ТП (оператор R_3).

$$U_1(\tau_1) = X_4^1(\tau_1) \times Z_1(\tau_{11}) \times M,$$

где $Z_1(\tau_{11})$ – множество параметров, передаваемых АСУТП и характеризующих загрузку оборудования в ТхП на время $\tau_{11} < \tau_1$, и связанное со време-

нем t_1 ; M – множество параметров, содержащихся в конструкторской документации, и необходимых для проектирования ТПр.

Функции ПД (оператор R_4).

Функция $\Delta Z_2(\tau_1)$ – определение отклонений фактических календарных планов-графиков от плана.

$$\Delta Z_2(\tau_1) = Z_2(\tau_1) \times q_5^1(\tau_1),$$

где $q_5^1(\tau_1)$ – фактическое выполнение календарных планов-графиков (КПГ) на время τ_1 .

Функция $p_5^1(\tau_1)$ – доведение до ТхП.

$$p_5^1(\tau_1) = Z_2(\tau_1) \times U_1^1(\tau_{11}).$$

Функция ТхП (диспетчеров) $q_5^1(\tau_1)$ – отслеживание фактического выполнения КПГ на время τ_1 .

Управление ЦФ на момент начала выполнения заказа. Обозначим время начала выполнения заказа t_2 .

Функции оператора R_0 .

$$X_1^1(t_2) = A(\tau_{A2}) \times W_1^1(\tau_2) \times W_2^1(\tau_2) \times W_2^2(\tau_2),$$

где $X_1^1(t_2)$ – указание о целевой функции проектируемых ТПр конкретного заказа на время t_2 ; $A(\tau_{A2})$, $W_1^1(\tau_2)$, $W_2^1(\tau_2)$ имеют тот же смысл, что и в формуле (1), но относятся ко времени τ_2 , связанном со временем $t_2 > \tau_2$; $W_2^2(\tau_2)$ – множество параметров, синтезируемых АСУТП и содержащие сведения о выполнении календарных планов на время τ_2 .

Функция $X_1^2(\tau_2) = K \times \tau_2$ эквивалентна (см. формулу (3)) функции $X_1^2(\tau_1)$.

Функция $X_1^3(t_2)$ указание о приоритетности рассматриваемого заказа, $K \rightarrow X_1^3(t_2)$.

Функция $X_3^1(t_2)$ аналогична по смыслу функции $X_1^1(t_2)$, но имеет формальную математическую запись.

$$X_3^1(t_2) = X_1^1(t_2) \times N.$$

$X_4^1(\tau_2)$ – задание, эквивалентное по смыслу $X_1^2(\tau_2)$, но относится к САПР ТП и представляет множество параметров, характеризующих задание на проектирование ТПр до времени τ_2 .

$X_4^1(t_2)$ – задание на перепроектирование спроектированного ранее технологического процесса поступает в САПР ТП, если ЦФ на начало проектирования $X_1^1(t_1)$ значительно отличается от целевой функции на начало выполнения заказа $X_1^1(t_2)$.

Функции УТхП.

$$W_1^1(\tau_2) = X_1^2(t_2) \times V_1^1(\tau_2) \times X_1^3(t_2) \times V_1^2(\tau_2),$$

где $V_1^2(\tau_2)$ – объемное отклонение по выполнению КПГ на время τ_2 .

Величины в формуле аналогичны по смыслу приведенным в формуле (4), но относятся ко времени τ_2 .

Функция $Y_1^1(t_2)$ – указание о приоритетности заказов при прохождении деталей по операциям при составлении календарных планов работы и календарных планов-графиков, запущенных на время t_2 .

$$Y_1^1(t_2) = X_1^3(t_2) \times ЧП,$$

где ЧП – частные приоритеты УТхП.

Функция $Y_1^2(t_2)$ – сроки выполнения заказов, запущенных на время t_2 .

$$Y_1^2(t_2) = X_1^2(t_2) \times PB.$$

Функция $Y_1^3(\tau_{21})$ – синтез множества параметров, характеризующих задания на выполнение заказов на период времени τ_{21} ; $Y_1^3(\tau_{21})$ по смыслу эквивалентно $X_1^2(\tau_2)$, но имеет другой отсчет времени $\tau_{21} < \tau_2$ и связано со временем t_2 .

$$Y_1^3(\tau_{11}) = X_1^2(\tau_1) \times \tau_{11}.$$

Функции АСУТП (оператор R_2):

$$W_2^1(\tau_2) = U_1(\tau_2) \times Y_1^2(\tau_2),$$

где $U_1(\tau_2)$ – множество параметров, характеризующих технологические процессы изготовления деталей заказов, спроектированные САПР ТП ко времени τ_2 ; $Y_1^2(\tau_2)$ – множество параметров, характеризующих сроки изготовления заказов, запущенных в обработку ко времени τ_2 .

$$W_2^2(\tau_2) = \Delta Z_2(\tau_2) \times U_1'(\tau_{21}) \times Y_1^1(t_2) \times PB.$$

Функция:

$$V_1^1(\tau_2) = U_1(\tau_{21}) \times Y_1^3(\tau_{21}) \times \Delta Z_2(\tau_2),$$

где $\Delta Z_2(\tau_2)$ – отклонение фактических календарных планов-графиков от плана.

Функция:

$$V_1^2(\tau_2) = \Delta Z_2(\tau_2) \times U_1'(\tau_{21}) \times Y_1^1(t_2) \times PB.$$

Функция $Z_1(\tau_{21})$:

$$Z_1(\tau_{21}) = U_1(\tau_{21}) \times Y_1^3(\tau_{21}),$$

где $U_1(\tau_{21})$ – множество параметров, характеризующих времена выполнения операций в ТПр, выполняемых до времени τ_{21} .

Функция $Z_2(\tau_2)$ – формирование календарных планов графиков на время t_2 .

$$Z_2(\tau_2) = U_1'(\tau_{21}) \times Y_1^1(t_2) \times PB,$$

где PB – резерв времени; $U_1'(\tau_{21})$ – последовательность и времена операций в маршрутах обработки деталей заказов.

Функция САПР ТП (оператор R_3):

$$U_1(\tau_2) = X_4^1(\tau_2) \times Z_1(\tau_{21}) \times M,$$

где $Z_1(\tau_{21})$ – множество параметров, передаваемых АСУТП и характеризующих загрузку оборудования в ТхП на время $\tau_{21} < \tau_2$, и связанное со временем t_2 .

Функции ПД (оператор R_4).

Функция $\Delta Z_2(\tau_2)$ – определение отклонений фактических календарных планов-графиков от плана.

$$\Delta Z_2(\tau_2) = Z_2(\tau_2) \times q_5^1(\tau_2),$$

где $q_5^1(\tau_2)$ – фактическое выполнение календарных планов-графиков (КПГ) на время τ_2 .

Функция $p_5^1(\tau_2)$ – доведение КПГ до ТхП.

$$p_5^1(\tau_2) = Z_2(\tau_2) \times U_1'(\tau_{21}).$$

Функция ТхП (диспетчеров) $q_5^1(\tau_2)$ – отслеживание фактического выполнения календарных планов-графиков (КПГ) на время τ_2 .

Анализируя модель, можно отметить следующее:

1. Исходя из того факта, что на различных этапах производства изделий контракта (проектирование технологий, непосредственное изготовление) информация, необходимая для задания целевой функции уточняется, обновляется и дополняется, то управление ЦФ должно быть построено в виде итерационных процедур, что соответствует и логике мышления проектировщика.

2. Так как информационные связи анализируются в динамике, их временные параметры должны быть синхронизированы, то для реализации модели целесообразно привлечение аппарата темпоральных логик.

3. Точность определения ЦФ во многом формируется инерционностью модели, т.е. разницей между t_1, τ_1, τ_{11} и между t_2, τ_2, τ_{21} , которую необходимо уменьшать.

4. Если заранее известно, что различие между временами t_1 и t_2 не будет более допустимого, то ЦФ следует определять для времени t_2 .

5. Учитывая эвристичность процедур принятия решений при проектировании ТПр в многономенклатурном производстве, в САПР ТП при определении целевой функции заказа должны реализовываться элементы искусственного интеллекта и нечеткой логики.

6. Реализация ЦФ происходит в САПР ТП, а ее окончательное формулирование совершается подсистемой УП. УП выступают в роли «согласователя» ЦФ, учитывая интересы СУО, ФП и УТхП. Надо отдавать отчет в том, что интересы этих подразделений не вполне противоречивы и отнюдь не

противоположны, как это иногда отмечается исследователями в области управления производством. Суть процедур, выполняемых УП, должна состоять в согласовании, прежде всего, понимания СУО, ФП и УТхП о ситуации, сложившейся: в производственной системе (ТхП) – свободные мощности, технологические возможности, наличие средств технологического оснащения (УТхП); в договорной политике организации (СУО); в финансовом управлении (ФП). Основная сложность состоит в том, что подразделения оперируют различными объектами, имеющими свою описательную область. Поэтому интеллектуальные процедуры уточнения (согласования) точек зрения подсистем на ситуацию с заказом носят итерационный характер, основываясь на использовании не только количественных, но и качественных показателей, спроецированных на предметную область, свойственную каждому оператору.

Заключение. Использование указанного подхода при разработке программных средств САПР ТП возможно на основе концепции организационно-технологического проектирования [3, 4], предусматривающего информационную интеграцию САПР ТП и АСУТП.

На основе исследования модели оказалось возможным построение алгоритмов функционирования системы управления ЦФ как подсистемы системы управления организацией. Это задает установку и придает осознанность деятельности производственной системы при проектировании ТПр, способствует целостности предприятия как системы.

Библиографический список

1. Бурдо, Г.Б. Теоретические основы комплексной автоматизированной системы проектирования и управления технологическими процессами в многономенклатурном производстве / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки. 2010. № 4(127). С. 44-54.
2. Бурдо, Г.Б. Метод интеллектуальной оценки решений при проектировании технологий в многономенклатурных производствах / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2011. Т. 17. № 2. С. 342-350.
3. Бурдо, Г.Б. Особенности автоматизированной технологической подготовки производства в геофизическом приборостроении / Г.Б. Бурдо, А.А. Исаев // Каротажник. 2013. № 3(225). С. 235-239.
4. Бурдо, Г.Б. Оценка решений в системах автоматизированного проектирования технологических процессов для многономенклатурных производств / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх // Вестник Воронежской государственной технологической академии. Серия «Информационные технологии, моделирование и управление». 2011. № 2. С. 99-102.
5. Горанский, Г.К. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ / Г.К. Горанский, Е.В. Владимиров, Л.Н. Ламбин. М.: Машиностроение, 1970. 224 с.
6. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Минск: Наука и техника, 1979. 264 с.
7. Кондаков, А.И. САПР технологических процессов / А.И. Кондаков // М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.
8. Евгеньев, Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования / Г.Б. Евгеньев // М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 334 с.

УДК 620.9

А.Н. Макаров, В.В. Рыбакова
Тверской государственной технической университет

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Взамен плазменно-дуговой сталеплавильной печи с вертикальным расположением плазматрона и дуги предложена конструкция печи с наклонным расположением плазматрона и дуги. При наклонном расположении дуга приближается к ванне металла, ее КПД увеличивается, расход электроэнергии снижается.

Ключевые слова: плазма, дуга, печь, энергосбережение.

RECONSTRUCTION OF PLASMA-ARC STEEL-MELTING FURNACE

The steel-melting furnace structure with inclined plasmatron and arc has been proposed as an alternative to vertical plasmatron and arc structure of plasma-arc steel-melting furnace. An inclined arc approaches the metal bath, its efficiency increases, power consumption decreases.

Keywords: plasma, arc, furnace, energy-saving.

В плазменно-дуговых сталеплавильных печах постоянного тока (ПДСПТ) 86–96% электрической мощности дуги преобразуется в поток излучения. Экспериментально подтверждено, что в рабочем пространстве ПДСПТ основным видом теплопередачи является радиационный теплообмен. После прорезки колодцев 92–93% мощности излучения дуги испускается ею на шихту и только 7–8% на водоохлаждаемые и футерованные поверхности свода. В эту часть периода расплавления КПД дуги $\eta_d = 0,89–0,91$.

В настоящее время типовой конструкцией для ПДСПТ является конструкция с одним сводовым и одним подовым электродами (рис. 1). Однако, как показывают расчеты и эксплуатация данной конструкции, электрическую дугу и плазматрон необходимо приблизить к ванне металла для увеличения доли излучения дуги на металл.

Задача увеличения излучения дуги на ванну металла решена за счет изменения конструкции сталеплавильной печи и введения в нее дополнительного наклонного плазматрона, расположенного под углом к ванне металла (рис. 2).

Аналитическими исследованиями установлено [1], что начало расплавления шихты в ПДСП необходимо вести вертикальной дугой, а когда свод и 2/3 поверхности стен освободятся от шихты для того, чтобы не допустить уменьшения КПД дуги плавку необходимо вести стеновым плазматроном с углом наклона дуги 15–30° к ванне металла [2]. КПД дуги η_d дуговой и плазменно-дуговой сталеплавильных печей определяли по следующим выражениям соответственно [3]:

$$\eta_{\text{ДДСП}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{д}}} = 0,08 + 0,9\varphi_{\text{дм}}, \quad (1)$$

$$\eta_{\text{ДПДСП}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{д}}} = 0,1 + 0,82\varphi_{\text{дм}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность дуги, идущая на нагрев, расплавление металла и шлака; $P_{\text{д}}$ – мощность дуги; $\varphi_{\text{дм}}$ – средний угловой коэффициент излучения дуги на металл, показывающий долю мощности, излучаемую столбом дуги на металл.

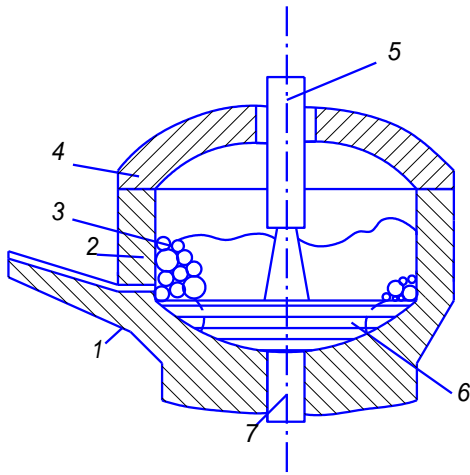


Рис. 1. Плазменно-дуговая сталеплавильная печь постоянного тока: 1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – шихта; 4 – свод; 5 – сводовый плазматрон; 6 – ванна металла; 7 – подовый электрод

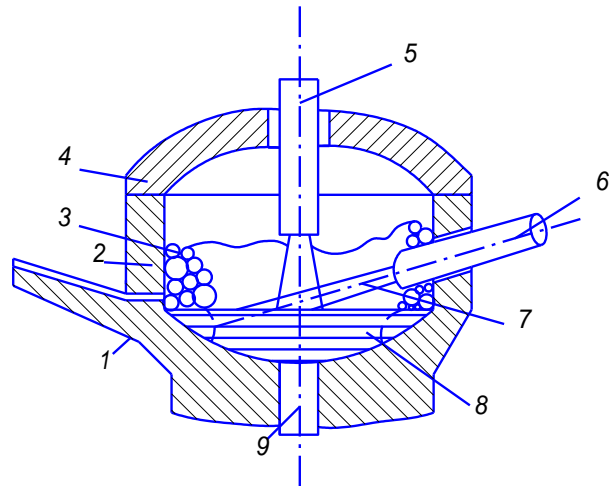


Рис. 2. Плазменно-дуговая сталеплавильная печь постоянного тока: 1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – шихта; 4 – свод; 5 – сводовый плазматрон; 6 – стеновой плазматрон; 7 – дуга; 8 – ванна металла; 9 – подовый электрод

В работах [1, 3] изложен аналитический метод определения средних угловых коэффициентов излучения дуг на ванну металла в дуговой и плазменно-дуговой сталеплавильных печах. Сущность метода в следующем: расчетная поверхность, представляющая собой круговую поверхность ванны металла, разбивается на элементарные площадки одинаковой площади $F_{\text{к}}$ и для каждой площадки рассчитывается локальный угловой коэффициент излучения $\varphi_{\text{лк}}$. Суммированием локальных угловых коэффициентов излучения $\varphi_{\text{лк}}$ получаем средний угловой коэффициент излучения дуги на расчетные элементы поверхности ванны металла $\varphi_{\text{дм}}$. В работе [4] приведены аналитические выражения для расчета локальных угловых коэффициентов излучения цилиндра (дуги, факела) на площадку, находящуюся напротив цилиндра на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси (рис. 3). Аналитическое выражение для определения локального углового коэффициента излучения при нахождении элементарной площадки на произвольной высоте на плоскости, наклоненной вправо от вертикальной оси, представлено ниже.

Локальный угловой коэффициент излучения линейного источника на поверхность элементарной площадки, расположенной на произвольной высоте, наклоненной вправо от вертикальной оси плоскости, определяется интегрированием выражения (5) в пределах изменения угла α_i от β_2 до β_1 :

$$\begin{aligned} \varphi_{\ell k} &= \int_{\beta_2}^{\beta_1} \frac{F_k}{\pi^2 r \ell_{\perp}} [\cos \alpha_i (\cos \alpha_i \cos \varphi - \sin \alpha_i \sin \varphi)] d\alpha = \\ &= \frac{F_k}{2\pi^2 r \ell_{\perp}} \left\{ \cos \varphi [\beta + \sin \beta \cos(\beta_1 + \beta_2)] - \sin \varphi (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta_2) \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Данное аналитическое выражение может быть использовано при проведении численного моделирования процессов теплопереноса в дуговых сталеплавильных печах с разной геометрией расположения вертикального и наклонного плазмотронов [5]. Результаты расчета могут быть использованы не только для оценки величины теплового излучения падающего на ванну металла, но так же и для прогнозирования величины и скорости износа футеровки, что положительно сказывается на долговечности и эффективности эксплуатации печи.

Из результатов расчета [3] следует, что после расплавления части шихты вертикальным плазмотроном с длиной дуги h , равной 0,5 диаметра ванны, необходимо переходить на плавку стали стеновым плазмотроном, установленным под углом 75° к вертикальной оси и при смещении анодного пятна в положение 4 (см. рис. 1). При этом доля излучения дуги на ванну металла возрастает с 21,6% до 39,6%, т.е. на 80%. Так как излучение составляет 82–90% мощности дуги, то КПД дуги возрастает на 66–72%. Расчеты, проведенные для энергетического режима шеститонной ПДСП, показывают, что при использовании в начале плавки вертикального плазмотрона и при переходе на стадии окончания расплавления и жидкого состояния расплава на работу стеновым плазмотроном с рассчитанным рациональным его положением снижается расход электроэнергии за плавку на 12–14%, время плавки сокращается на 15–16%.

Заключение. Аналитическими исследованиями установлено, что в плазменно-дуговой сталеплавильной печи после формирования ванны металла и расплавления 50–60% шихты средний угловой коэффициент излучения вертикальной дуги на ванну металла и шихту на стенах снижается с 0,90–0,95 до 0,45–0,50, КПД дуги уменьшается в 2 раза. В периоды жидкого состояния расплава, чем ближе дуга расположена к ванне металла, тем больше ее средний угловой коэффициент излучения на ванну, тем больше КПД дуги. Предложена конструкция плазменно-дуговой сталеплавильной печи с наклонным плазмотроном, дуга которого, расположенная под углом $15–45^\circ$ к ванне металла, осуществляет доплавление шихты и нагрев ванны, что приводит к увеличению излучения дуги на металл, увеличению скорости нагрева металла, производительности печи, снижению удельного расхода электроэнергии.

Библиографический список

1. Макаров, А.Н. Рациональное положение плазмотрона и энергосбережение в плазменно-дуговых сталеплавильных печах / А.Н. Макаров, Р.М. Зуйков, Ю.А. Луговой // *Электротехнология*. 2009. С. 18-24.
2. Патент RU № 2330072. Способ плавки стали в плазменно-дуговой печи постоянного тока / А.Н. Макаров, Р.М. Зуйков; заявл. 13.11.2006; опубл. 27.07.2008. Бюл. № 27.
3. Макаров, А.Н. Энергосбережение при производстве стали в плазменно-дуговых печах / А.Н. Макаров, Ю.А. Луговой, Р.М. Зуйков // *Электротехнология*. 2010. № 9. С. 32-37.
4. Макаров, А.Н. Закономерности, сопровождающие горение электрической дуги и факела в металлургических печах. Ч. II / А.Н. Макаров // *Электротехнология*. 2012. № 8. С. 28-35.
5. Макаров, А.Н. Инновационные устройства электродуговых и факельных металлургических печей. Ч. 1. Плазменно-дуговые и дуговые сталеплавильные печи постоянного тока / А.Н. Макаров, В.В. Рыбакова, Е.В. Круглов // *Электротехнология*. 2013. № 4. С. 2-6.

УДК 620.9

А.Н. Макаров, А.В. Кузнецов, М.К. Галичева
Тверской государственный технический университет

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕКУПЕРАТИВНЫЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ КОЛОДЦЫ

Показано несовершенство рекуперативных нагревательных колодцев с одним верхним факелом. Верхняя часть слитков при таком расположении факела греется быстрее, нижняя медленнее. В целом время нагрева и расход топлива увеличиваются. С целью уменьшения времени нагрева и расхода топлива предложена конструкция колодца с двумя факелами, верхним и нижним. Конструкция защищена патентом на изобретение.

Ключевые слова: печь, факел, теплообмен, энергосбережение.

INNOVATIVE RECUPERATIVE HEATING PITS

Imperfection of recuperative heating pits with one upper flame is shown. As a result of such flame location upper ingots are heated faster and lower ingots are heated slowly. Heating time and fuel consumption increase on the whole. To decrease heating time and fuel consumption, pit construction with both upper and lower flames is proposed. The construction is covered by the patent.

Keywords: furnace, flame, heat exchange, energy-saving.

Нагревательные колодцы служат для нагрева стальных слитков перед прокаткой. Как в России, так и за границей наибольшее распространение получили рекуперативные колодцы [1]. Распространены рекуперативные колодцы с подводом топлива и воздуха из центра подины и с подковообразным пламенем.

В рекуперативных колодцах с подводом топлива и воздуха из центра подины горелка установлена в центре подины. Слитки в них размещаются вокруг горелки на определенном расстоянии от стенки и горелки с тем, чтобы не оплавились их грани, обращенные к горелке. Поток горячего газа омывает слитки по всей высоте, продукты сгорания отводятся в рекуператоры. Но образующиеся в углах ячеек мертвые зоны, где плохо нагревается металл, вынуждают устанавливать дополнительные горелки небольших размеров, которые обеспечивают турбулентность газов и, следовательно, качественный нагрев слитков.

На новых блюмингах установили рекуперативные колодцы с подковообразным пламенем – с одной верхней горелкой, каждая из групп которых имеет две или четыре многоместных ячейки. Газ и воздух подаются через трубу, расположенную в верхней части стенки, продукты сгорания нагревают кладку рекуператоров и уходят через окно, расположенное в нижней части той же стенки. Работа горелки основана на пульсировании подаваемого газа и воздуха внутрь ячейки.

Теплотехническая особенность работы этих колодцев не обеспечивает равномерного нагрева как различных слитков, находящихся на неодинаковом удалении от горелки, так и каждого слитка в отдельности по высоте и сечению. Верхние и нижние части слитков нагреваются до более высокой температуры (вплоть до оплавления), чем середина [2–4].

Наиболее современной конструкцией нагревательных колодцев являются рекуперативные колодцы с одной верхней горелкой (рис. 1). Они имеют удлиненную форму, горелка устанавливается в верхней части торцевой стены, а слитки размещаются в один ряд вдоль боковых стен.

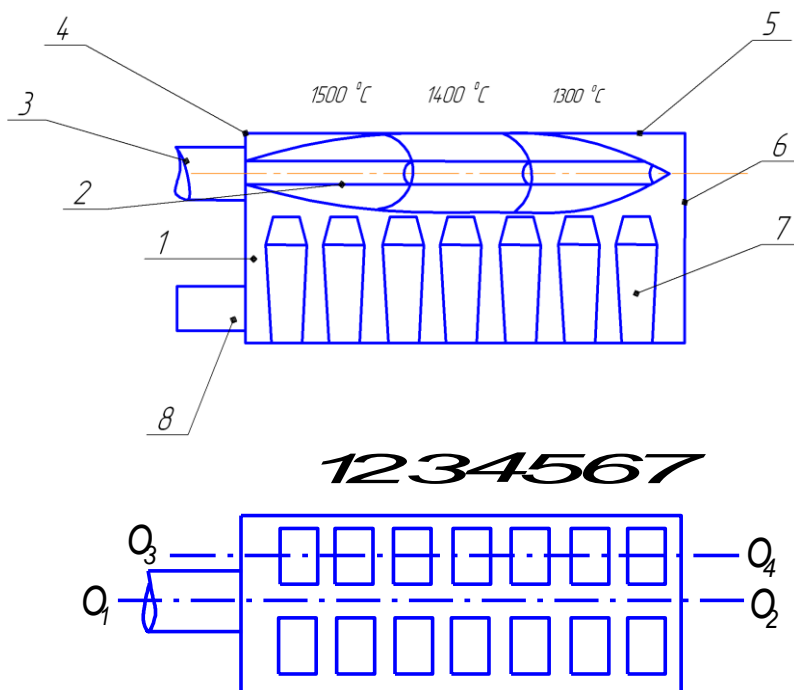


Рис. 1. Схема рабочего пространства нагревательного колодца и размещения слитков в нем: 1÷7 – номера рядов слитков

Колодцы с одной верхней горелкой в последнее время конструктивно усовершенствованы. Для создания более рационального потока газов, устранения мертвых зон целесообразно устанавливать горелки на противоположных сторонах ячеек. Расположение горелок может быть со смещением осей. Все это обеспечивает лучший нагрев металла.

Камера 1 колодца представляет собой прямой параллелепипед длиной 8 м, шириной 3 м, высотой 4 м (см. рис. 1).

Ось O_1O_2 факела 2 и горелки 3, расположенной на фронтальной стене 4, параллельна крышке печи 5 и удалена от нее на расстояние 0,8 м. В рабочем пространстве печи от фронтальной стены 4 до задней стены 6 размещены в две колонны и семь рядов четырнадцать слитков 7 массой по 7 т и высотой 2,4 м [3]. В нижней части печи на фронтальной стене 4 расположены каналы 8 для удаления дымовых газов из рабочего пространства колодца.

Распределение теплового потока от факела зависит от угла раскрытия факела β . При использовании в колодце горелок с углом $\beta = 38^\circ$ вместо $\beta = 25^\circ$ зона активного горения смещается к фронтальной стене, что сказывается и на распределении интегрального потока по верхней поверхности слитков (рис. 2).

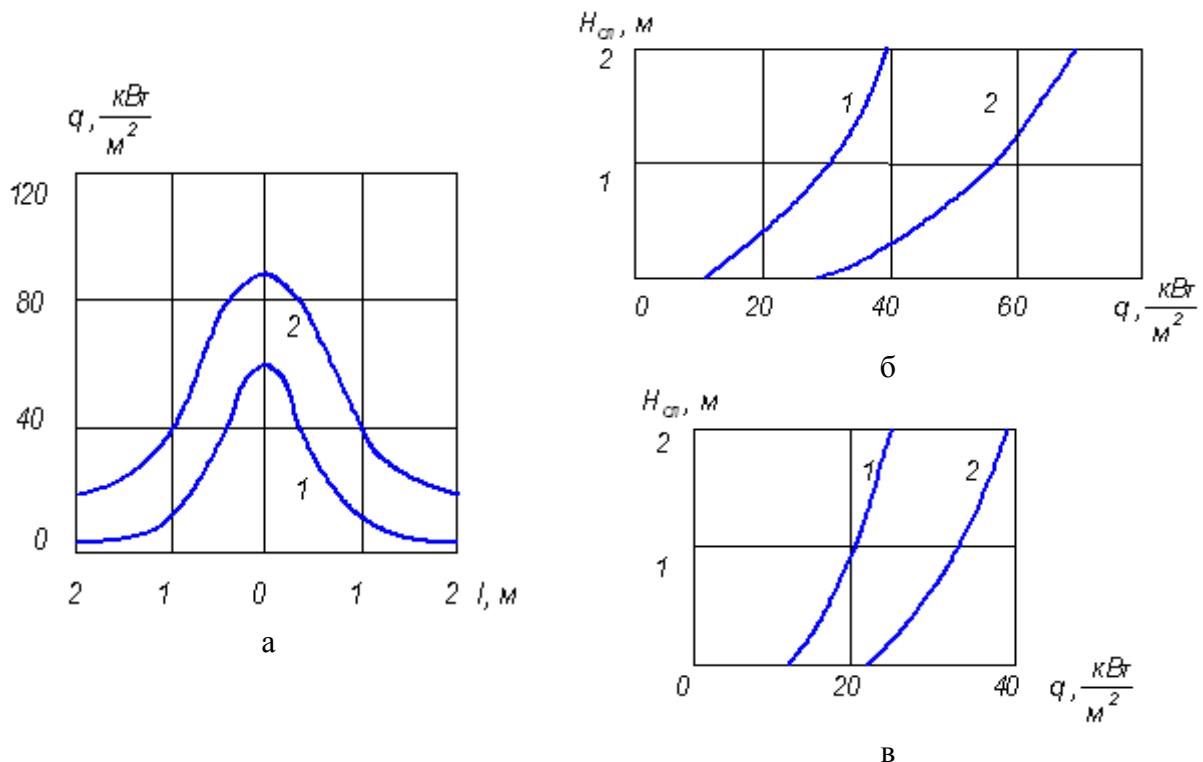


Рис. 2. График распределения тепловых потоков: в окрестности точки O_2 (а), интегральных по высоте боковой поверхности слитков, обращенной к поверхности стен (б) и к оси O_1O_2 (в):

а: 1 – от факела; 2 – рассчитанное значение [4];

б: 1 – по высоте I, II, VI рядов; 2 – по высоте слитков III – V, VII рядов;

в: 1 – по высоте слитков I, II, VI, VII рядов; 2 – по высоте слитков III – V рядов

Из проведенного расчета [5] распределения тепловых потоков по поверхности слитков следует, что неравномерность интегральных тепловых потоков при этом снижается, что хорошо согласуется с практикой эксплуатации нагревательных колодцев.

Первый способ, применяемый для уменьшения неравномерности тепловых потоков и температур по поверхности слитков, заключается в усовершенствовании горелки для исключения отставания нагрева слитков, расположенных около горелочной стены, при этом угол раскрытия факела увеличился с 27 до 36° , что позволяет сократить неравномерность тепловых потоков и температур по длине рабочего пространства колодца [3].

Максимальная плотность интегрального теплового потока на поверхности футеровки находится в точке O_2 пересечения оси горелки и факела с задней стеной и составляет 90 кВт/м^2 (см. рис. 2а). Здесь же отмечается и максимальная плотность падающего потока излучения факела на поверхность нагрева – 60 кВт/м^2 , что в 2 раза больше максимальной плотности потока излучения факела на верхнюю горизонтальную поверхность слитков.

Второй способ, применяемый для уменьшения неравномерности тепловых потоков и температур по поверхности слитков, заключается в использовании горелки с качающимся в вертикальной плоскости соплом. Таким способом можно добиться периодического изменения направления факела, чтобы, изменяя зону высоких тепловых потоков, более равномерно нагревать слитки. Этот способ реализован на действующем нагревательном колодце, в результате чего неравномерность нагрева слитков уменьшилась в 2 раза, а скорость нагрева металла увеличилась [3].

Распределение тепловых потоков по высоте боковой поверхности слитков $H_{\text{сл}}$, обращенной к поверхности стен, отличается значительной неравномерностью (см. рис. 2б). На эту поверхность слитков излучение от факела практически не попадает, и нагрев ее осуществляется за счет излучения стен, продуктов сгорания и конвективного теплового потока. В верхней части боковой поверхности слитков рядов 3–5, 7 интегральные тепловые потоки составляют свыше 60 кВт/м^2 , в нижней – менее 35 кВт/м^2 . Максимального значения потоки излучения от поверхности на i -ю элементарную площадку достигают в том случае, когда она параллельна поверхности и находится напротив центра симметрии поверхности [4]. Напротив центра симметрии боковых поверхностей стен находятся ряды 3–5 слитков, ряд 7 расположен напротив центра симметрии задней стены и напротив периферии боковых стен, за счет чего по высоте боковой поверхности слитков, обращенной к задней стене, создается такое же распределение тепловых потоков, как по боковой поверхности слитков рядов 3–5 (кривая 2 на рис. 2б). Кривая 1 характеризует распределение тепловых потоков по высоте слитков рядов 2 и 6, находящихся на периферии, а также ряда 1, вследствие того, что половина футеровки фронтальной стены выведена из

теплообмена каналами для удаления дымовых газов и амбразурой горелки и на боковую поверхность слитков ряда 1 тепла не излучается.

На рис. 2в приведены графики распределения тепловых потоков по высоте боковой поверхности слитков, обращенной к оси симметрии печи. Нагрев этой поверхности осуществляется в основном за счет излучения на нее крышки, продуктов сгорания и конвективного теплового потока. Несмотря на то, что боковая поверхность слитков, обращенная к оси симметрии печи, находится под факелом, излучение его на эту поверхность не превышает 10% рассчитанного интегрального теплового потока [4].

Значительная неравномерность нагрева слитков по высоте выявлена в результате измерения температуры в различных точках рабочего пространства колодца и нагреваемых слитков (рис. 3). Верхняя часть слитков нагревается быстрее. В начале нагрева перепад температур между верхней и нижними частями слитков достигает 300°C . Перепад температур уменьшается по мере прогрева садки и по истечении 25% времени нагрева слитков до заданной температуры составляет $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$ и остается таким на всем протяжении нагрева [3].

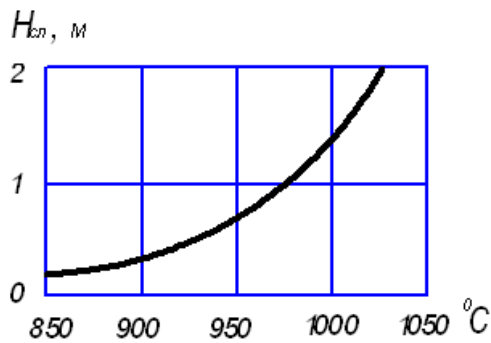


Рис. 3. Изменение температуры по высоте слитков на расстоянии 80 мм от поверхности в процессе нагрева [2]

каждого слитка по высоте, неодинаковая скорость нагрева слитков, расположенных в разных местах рабочего пространства объясняются с использованием метода расчета теплообмена в нагревательных колодцах [5]. Неравномерное распределение тепловых потоков и температур, неравномерный нагрев слитков заставляют выдерживать всю садку дополнительное время, снижают производительность, увеличивают расход топлива. После расчета и анализа распределения тепловых потоков по длине печи и высоте слитков можно разработать меры по выравниванию тепловых потоков по поверхности слитков. К таким мерам относится циклический нагрев слитков факелом с использованием двух углов раскрытия. В течение первой половины цикла угол раскрытия факела $19\text{--}21^{\circ}$, а в течение второй половины — $44\text{--}46^{\circ}$, время цикла 1–2 мин, время раскрытия каждого из углов факела 0,5–1 мин [3]. Многоциклический режим нагрева с двумя заданными углами раскрытия факела позволяет повысить равномерность нагрева слитков, производительность колодца и сократить удельный расход топлива на нагрев.

Как следует из анализа рис. 2, 3, максимальным измеренным температурам соответствуют наибольшие тепловые потоки, полученные расчетным путем, что подтверждает адекватность математической модели расчета теплообмена реальным процессам теплообмена, протекающим в нагревательном колодце.

Неравномерное распределение температур по длине рабочего пространства, неравномерность нагрева

Для выравнивания скорости нагрева слитков используют также горелку с качающимся газовым соплом [2]. Направление факела непрерывно изменяется путем качания сопла в вертикальной плоскости, при этом распределение температур по длине рабочего пространства колодца становится более равномерным. Перепад температур между верхними и нижними частями слитков уменьшается с 100–150°C до 60–80°C. Металл при этом нагревается быстрее без увеличения расхода топлива. Для выравнивания тепловых потоков и температур в колодцах используют и другие способы воздействия на факел [2].

Третий способ, применимый для уменьшения неравномерности тепловых потоков и температур по поверхности слитков, состоит в следующем. Предлагается новая конструкция рекуперативного нагревательного колодца с двумя факелами (рис. 4). Поставленная цель достигается тем, что рекуперативный нагревательный колодец состоит из камеры, выполненной в форме прямоугольного параллелепипеда, ограниченной футерованными стенами и подом и снабжен перемещающейся крышкой и горелкой. Колодец дополнительно содержит горелку, расположенную в нижней части на задней стене над подом на расстоянии от него, равном 0,25–0,30 высоты стен. Два отверстия в поде служат для подачи воздуха и создания диффузного факела.

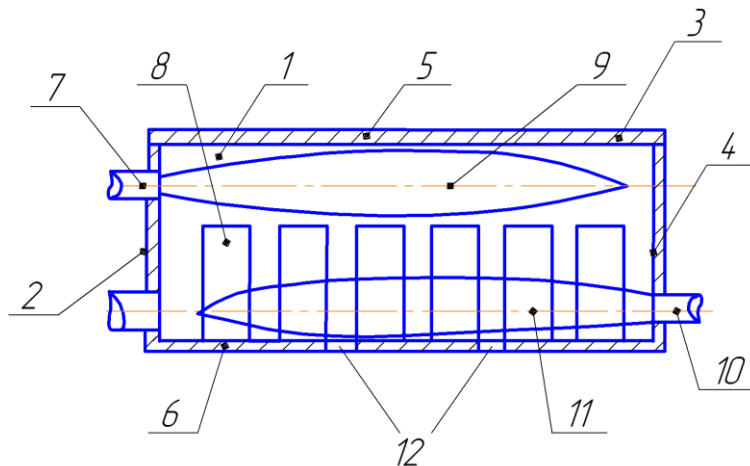


Рис. 4. Схема рекуперативного нагревательного колодца с двумя факелами:
 1 – камера; 2 – фронтальная стена; 3 – боковая стена; 4 – задняя стена;
 5 – перемещающаяся крышка; 6 – под; 7 – горелка; 8 – слитки; 9 – верхний факел;
 10 – горелка; 11 – нижний факел; 12 – отверстия для подачи воздуха

Наличие горелки, расположенной на задней стене над подом на расстоянии 0,25–0,30 высоты стен от пода и двух отверстий в поде для подачи воздуха позволяет создать факел в нижней части камеры, который совместно с факелом в верхней части камеры обеспечивает равномерность нагрева слитков по высоте. Это приведет к уменьшению времени нагрева слитков, повышению производительности, снижению расхода топлива.

Верхний факел 9 нагревает верхнюю часть слитков, а нижний факел 11 нагревает нижнюю часть слитков 8, в результате чего суммарные тепловые потоки, падающие от факелов 9 и 11 на поверхность слитков 8, выравниваются, в результате чего увеличивается равномерность нагрева слитков 8 по высоте (рис. 5).

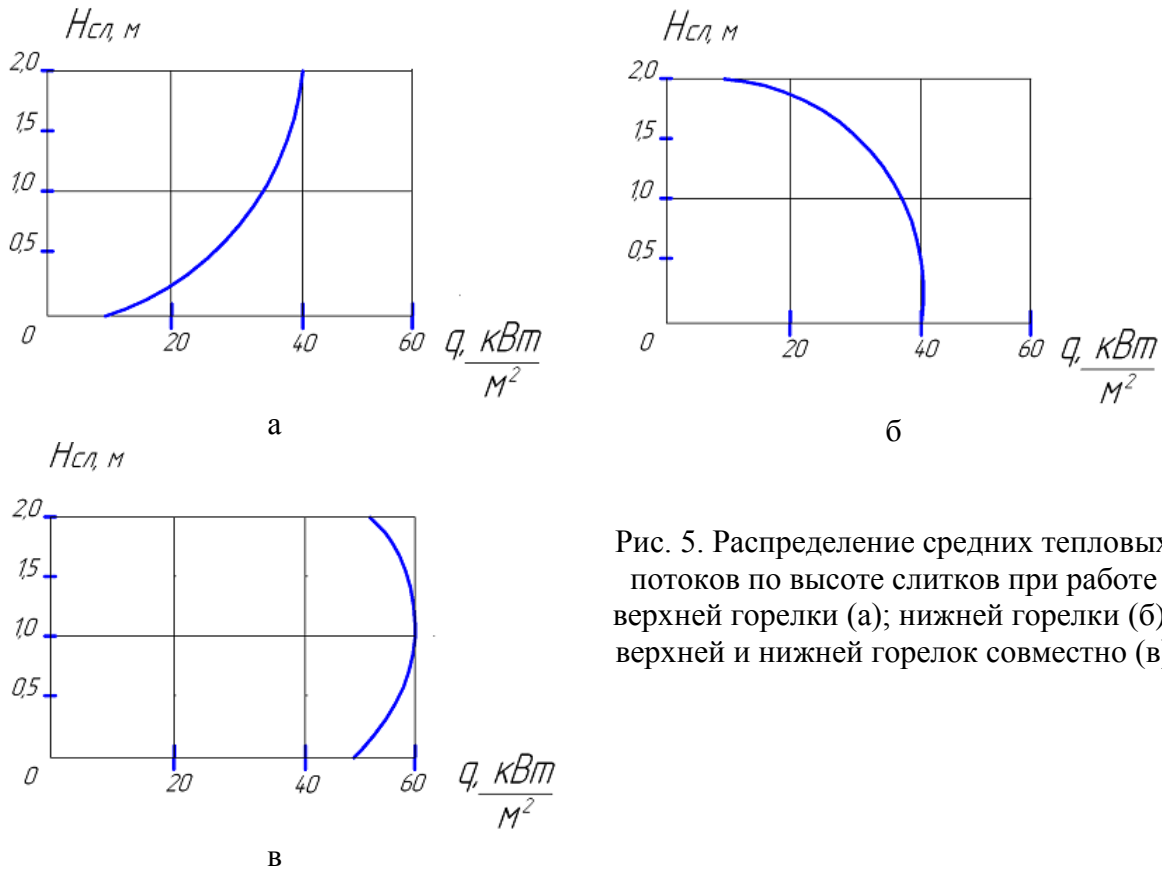


Рис. 5. Распределение средних тепловых потоков по высоте слитков при работе верхней горелки (а); нижней горелки (б); верхней и нижней горелок совместно (в)

Равномерное распределение тепловых потоков и температуры по высоте слитков 8 значительно уменьшает время их нагрева до необходимой температуры, повышает производительность рекуперативного нагревательного колодца, снижает расход топлива.

В расчетах использовано математическое моделирование теплообмена, при котором факел в нагревательной печи представлен объемным телом в виде соосных излучающих цилиндров, длина и мощность которых зависят от распределения изотерм в рабочем пространстве печи [4].

Заключение. Разработаны научным коллективом под руководством зав. кафедрой ЭСиЭ профессора А.Н. Макарова и защищены патентами на изобретения регенеративные нагревательные колодцы с двухъярусным расположением блоков регенераторов [5], с дополнительными верхними горелками [6], с вращением слитков в процессе нагрева [7] и способ нагрева слитков в рекуперативном нагревательном колодце [3]. Разработанные устройства и способы обеспечивают равномерность нагрева слитков по высоте, что приводит к уменьшению времени нагрева, повышению произ-

водительности колодцев, снижению расхода топлива. Разработки научного коллектива [3, 5–7] представлены на V Международном форуме по интеллектуальной собственности, Москва, ЦВК «Экспоцентр». Экспертный совет жюри форума 27 ноября 2013 года присудил разработчикам научного коллектива серебряную медаль.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.В37.21.1067).

Библиографический список

1. Диомидов, Б.Б. Прокатное производство / Б.Б. Диомидов, Н.В. Литовченко. М.: Metallurgy. 348 с.
2. Кривандин, В.А. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии: учебник / В.А. Кривандин, А.В. Егоров. М.: Metallurgy, 1989. 462 с.
3. Патент RU № 2274663. Способ нагрева слитков в нагревательном колодце / А.Н. Макаров, А.Ю. Дунаев; заявл. 09.11.2004; опубл. 20.04.2006. Бюл. № 11.
4. Макаров, А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках / А.Н. Макаров. СПб: Лань, 2014. 498 с.
5. Патент RU № 2312907. Регенеративный нагревательный колодец / А.Н. Макаров, В.В. Воропаев; заявл. 12.04.2006; опубл. 20.12.2007. Бюл. № 35.
6. Патент RU № 2457262. Регенеративный нагревательный колодец / А.Н. Макаров, А.Г. Щеглов; заявл. 01.04.2011; опубл. 27.07.2012. Бюл. № 21.
7. Патент RU № 2446218. Регенеративный нагревательный колодец / А.Н. Макаров, М.С. Лычагин; заявл. 17.06.2010; опубл. 27.03.2012. Бюл. № 36.

УДК 620.9

А.Ю. Русин, Абдулхамед Мохаммед
Тверской государственный технический университет

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ ОБОРУДОВАНИЯ

В работе выполнены экспериментальные исследования точности максимального правдоподобия закона распределения Вейбулла для оценки надежности электрооборудования. По результатам моделирования построены графики правдоподобия закона распределения Вейбулла. Осуществлен расчет и моделирование на ЭВМ параметров выборки.

Ключевые слова: надежность, моделирование, параметры.

PARAMETRIC ESTIMATION OF RELIABILITY FACTORS IN ACCELERATED EQUIPMENT TESTING

The accuracy of maximum likelihood of Weibull distribution for electrical equipment reliability estimation has been studied experimentally. The graphs of Weibull distribution likelihood in accordance with simulation results are plotted. Sample characteristic was simulated and calculated with computer.

Keywords: reliability, simulation, parameters.

Существует несколько планов испытаний оборудования на надежность. Рассмотрим план $[N, U, T]$, который приведен в стандарте [1]. Согласно этому плану одновременно испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают по истечении времени испытаний или наработки T для каждого не отказавшего объекта. В новом стандарте [2], действующем в настоящее время, также существует план испытаний, подобный этому. Это одноступенчатый план, ограниченный продолжительностью или числом отказов.

При проведении испытаний по плану $[N, U, T]$ образуются однократно цензурированные выборки наработок на отказ. При параметрическом оценивании показателей надежности, например, средней наработки до отказа, по однократно цензурированным справа выборкам основным математическим методом является метод максимального правдоподобия. В условиях постоянного повышения надежности испытываемого оборудования и желаемого сокращения времени испытаний становится актуальным вопрос исследования достоверности оценок максимального правдоподобия (МП).

В работе выполнены экспериментальные исследования точности оценок максимального правдоподобия параметров закона распределения Вейбулла по малым, однократно цензурированным справа выборкам, формирующимся по плану $[N, U, T]$.

На ЭВМ моделировались однократно цензурированные справа выборки случайных величин объемом $N = 5, 10, 15, 20, 25$. Генерирование выборок выполнялось при ограничениях

$$6 \leq N < 10, q \geq 0,5,$$

$$10 \leq N < 20, q \geq 0,3,$$

$$20 \leq N \leq 50, q \geq 0,2,$$

где q – степень цензурирования выборки. Ограничения приняты в соответствии с рекомендациями [7].

Количество сформированных выборок для каждого значения N равно 3 000. По каждой выборке методом максимального правдоподобия рассчитывались оценки параметра формы и масштаба закона распределения Вейбулла и их относительные отклонения δ от истинных значений, которые использовались при генерации выборки.

$$\delta = \frac{p - p_{МП}}{p}, \quad (1)$$

где p – истинное значение параметра экспоненциального распределения; $p_{МП}$ – оценка максимального правдоподобия экспоненциального распределения.

По результатам моделирования построены гистограммы относительных отклонений оценок максимального правдоподобия параметров закона распределения Вейбулла. По оси ординат отложены проценты оценок от общего количества попавших в данный интервал. Полученные результаты приведены на рис. 1 и 2.

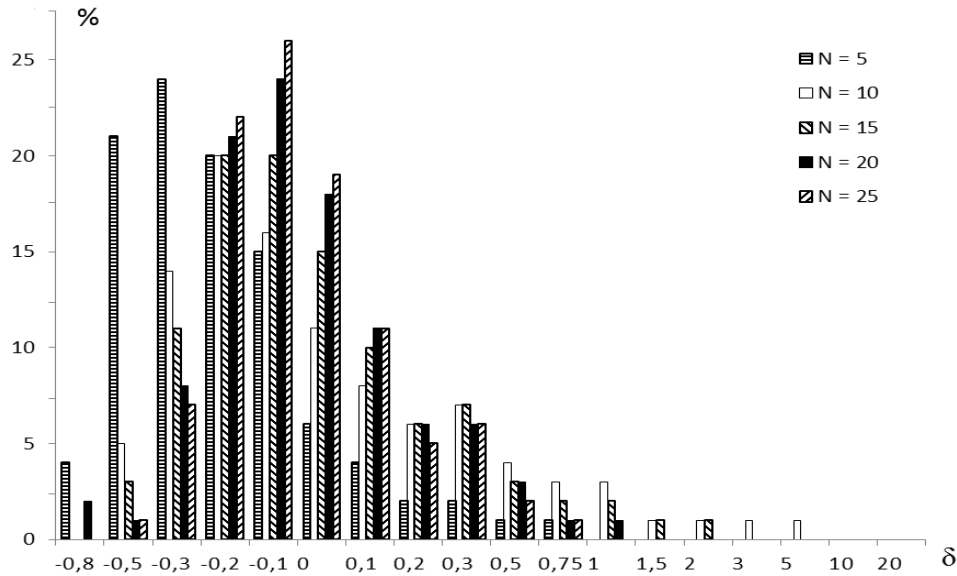


Рис. 1. Относительные отклонения оценки максимального правдоподобия параметра масштаба закона распределения Вейбулла

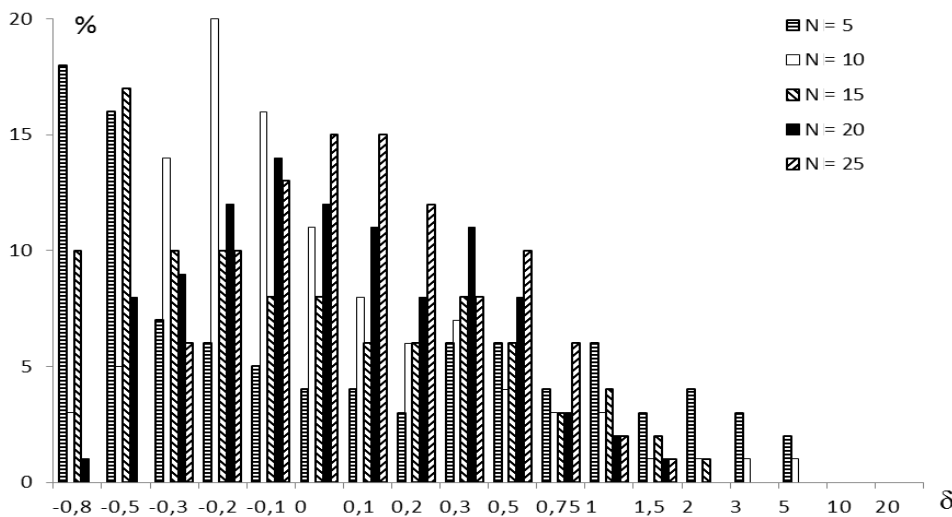


Рис. 2. Относительные отклонения оценки максимального правдоподобия параметра формы закона распределения Вейбулла

Экспериментальные данные показывают, что большинство оценок максимального правдоподобия, полученные по малым, однократно цензурированным справа выборкам, имеют значительные отклонения от истинных значений. Например, 24% оценок параметра масштаба распределения Вейбулла при $N = 5$ (см. рис. 1) имеют относительные отклонения от 0,2 до 0,3; 21% – относительные отклонения от 0,3 до 0,2 и 4% – более 0,8. С уве-

личением объема выборки точность оценок возрастает. При $N = 25$ 78% относительных отклонений оценок параметра масштаба практически не превышают 0,2. Несмотря на это, 12% оценок имеют относительные отклонения от 0,2 до 0,3; 7% от 0,3 до 0,5; 3% от 0,5 до 1. Еще более низкую точность имеют оценки параметра формы закона распределения Вейбулла. Для $N = 5$ 24% оценок имеет отклонения от 0,5 до 0,75; 10% от 0,5 до 1; 9% от 1 до 2 и 9% более 2. При $N = 25$ 65% относительных отклонений оценок параметра формы не превышают 0,3. При этом 6% оценок имеют относительные отклонения от 0,75 до 1; 2% – от 1 до 1,5; 1% – от 1,5 до 2.

На рис. 3 и 4 показаны полигоны частот плотности вероятности относительных отклонений оценки максимального правдоподобия параметров закона распределения Вейбулла для различных N при общем количестве выборок $K = 3\,000$.



Рис. 3. Относительные отклонения оценок МП параметра масштаба закона распределения Вейбулла

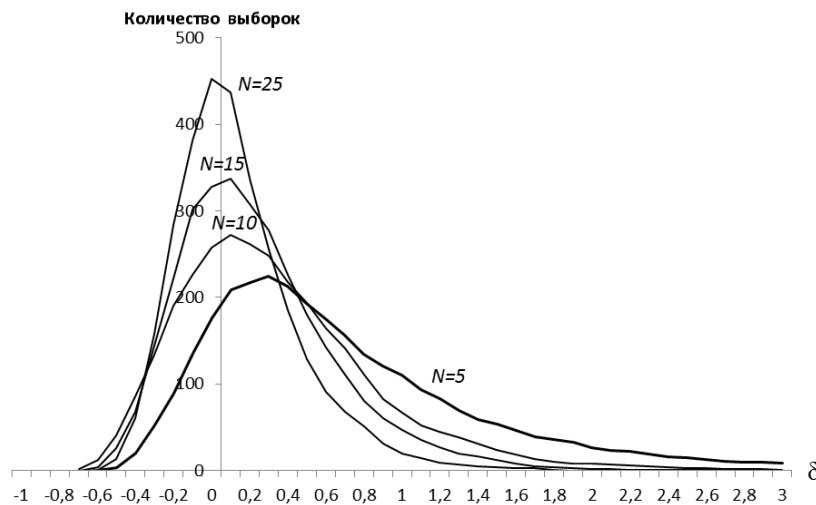


Рис. 4. Относительные отклонения оценок МП параметра формы закона распределения Вейбулла

В целом можно сделать вывод, что точность метода максимального правдоподобия при значениях $N < 25$ низка. Относительное отклонение оценок от истинных значений может достигать 100% и более.

В ряде работ [3–5] проведены исследования, позволяющие установить зависимость смещения оценки параметров законов распределения, полученных методом максимального правдоподобия, от характеристик выборки величин наработок на отказ. В результате исследований получены зависимости смещения математического ожидания оценки МП от объема выборки N , коэффициента вариации V и степени усечения q . В работе [3] предложен способ введения поправок к оценке МП. Для заданных величин N , V и q по полученным зависимостям определяется смещение $\delta_{\text{см}}$ оценки МП p' . Несмещенную оценку p'_H получают по формуле

$$p'_H = \frac{p}{1 + \delta_{\text{см}}}.$$

В перечисленных работах рассматривается влияние на смещение оценки максимального правдоподобия небольшого количества (одного – двух) параметров выборки, что не позволяет глубоко изучить зависимость смещения оценки максимального правдоподобия от структуры выборки. При этом дополнительная информация об оценке параметров распределения, содержащаяся в структуре выборки, используется незначительно.

Цель проведенных исследований в общем виде можно сформулировать следующим образом – получение математических моделей, устанавливающих связь между отклонением оценок МП от истинного значения параметра экспоненциального распределения и параметрами, характеризующими структуру выборки.

Решение поставленной задачи осуществлялось в пять этапов:

1. Моделирование на ЭВМ однократно цензурированных справа выборок случайных величин, распределенных по закону Вейбулла, характерных для плана испытаний $[N, U, T]$, и расчет параметров выборки, характеризующих ее структуру. Для описания структуры сформированной выборки случайных величин в работе использовались стандартные параметры и их производные:

- степень цензурирования

$$X_1 = q = \frac{k}{N},$$

где k – число полных случайных величин; N – число членов выборки;

- коэффициент вариации

$$X_2 = \frac{S}{\bar{Z}},$$

где S – оценка среднеквадратического отклонения всех случайных величин в выборке; \bar{Z} – математическое ожидание всех членов выборки;

- коэффициент вариации полных случайных величин

$$X_3 = \frac{S_{II}}{Z},$$

где S_{II} – оценка среднеквадратического отклонения полных случайных величин;

- эмпирический коэффициент асимметрии, коэффициент эксцесса [4]

$$X_4 = \tilde{A} = \frac{(\bar{z} - \bar{Z})^3}{\left(\sqrt{(\bar{z} - \bar{Z})^2}\right)^3};$$

- коэффициент эксцесса (коэффициент крутости)

$$X_5 = \tilde{E} = \frac{\tilde{\mu}_4}{S^4} - 3,$$

где $\tilde{\mu}_4$ – центральный момент четвертого порядка.

Еще пять параметров представляют собой математические выражения, составленные из стандартных характеристик выборки:

- отношение математического ожидания полных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки

$$X_6 = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}};$$

- отношение математического ожидания цензурированных случайных величин к математическому ожиданию всех членов выборки

$$X_7 = \frac{\bar{Z}_{II}}{\bar{Z}};$$

- относительное отклонение математического ожидания от середины вариационного размаха

$$X_8 = \frac{\frac{R}{2} - \bar{Z}}{\bar{Z}},$$

где $R = Z_{\max} - Z_{\min}$ – вариационный размах; Z_{\max} , Z_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения случайной величины;

- отношение медианы к математическому ожиданию случайных величин

$$X_9 = \frac{\tilde{M}_e}{\bar{Z}},$$

где \tilde{M}_e – медиана – значение случайной величины, приходящееся на середину ранжированного ряда наблюдений;

- отношение моды к математическому ожиданию

$$X_{10} = \frac{\tilde{M}_o}{\bar{Z}},$$

где \tilde{M}_o – мода – значение случайной величины, которое наблюдалось наибольшее число раз.

Все параметры измеряются в относительных единицах и не зависят от абсолютных значений случайных величин. Это сделано специально, чтобы можно было применять полученные уравнения к оборудованию со средними наработками на отказ разной величины.

2. Расчет оценок максимального правдоподобия параметра формы и масштаба закона распределения Вейбулла.

3. Расчет зависимого параметра – отклонение оценки максимального правдоподобия от истинного значения по формуле

$$Y = \frac{P}{P_{ОМП}}.$$

4. Построение регрессионных зависимостей. В результате исследований построены регрессионные математические модели, устанавливающие связь между отклонением оценки МП от истинного значения и параметрами, характеризующими структуру выборки. Для каждого объема выборки N построено свое уравнение регрессии.

Математические модели построены в классе линейных уравнений регрессии вида

$$\bar{y}(x) = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_{11} x.$$
 (2)

Полученные уравнения регрессии позволяют повысить точность оценки максимального правдоподобия введением поправки $\bar{y}(x)$ к оценке МП по формуле

$$P_{кон} = P_{ОМП} \cdot \bar{y}(x),$$
 (3)

где $P_{кон}$ – конечная оценка параметра распределения.

5. В исследованиях была проведена оценка эффективности построенных уравнений регрессии. Для каждой сгенерированной выборки по уравнениям регрессии (2) были рассчитаны поправки к оценке МП и конечная оценка параметра распределения по выражению (3).

Результаты исследований эффективности применения построенных уравнений регрессии для экспоненциального закона распределения показаны на рис. 5–6.

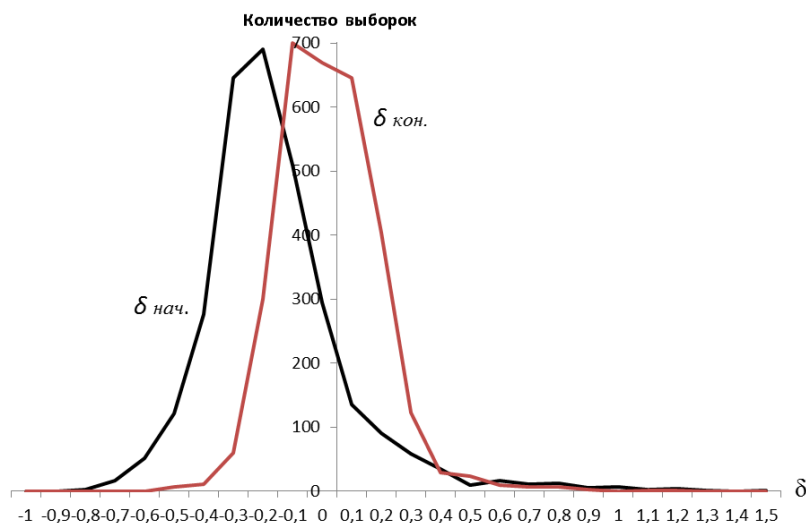


Рис. 5. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра масштаба для $N = 5$

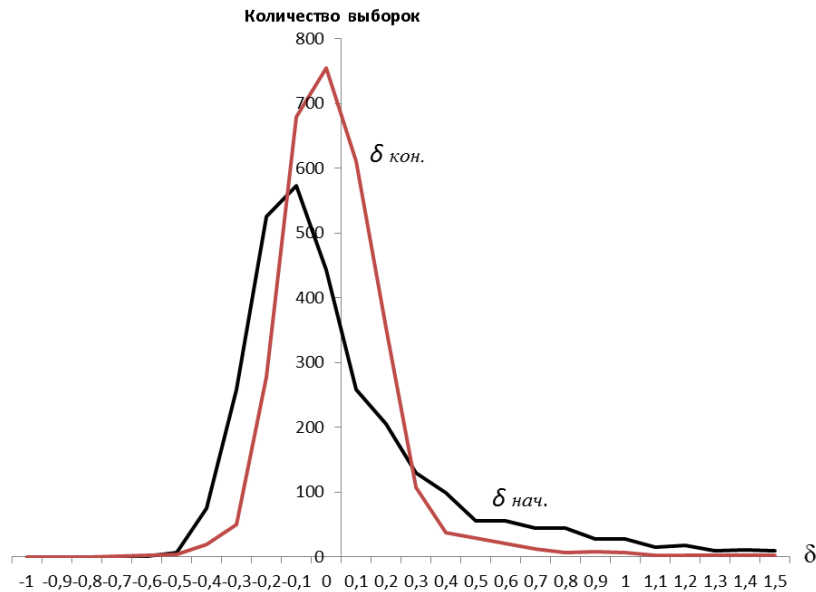


Рис. 6. Начальные и конечные отклонения оценок МП параметра масштаба для $N = 10$

Графики, приведенные на рис. 2–6, показывают, что точность оценок МП после применения разработанных моделей и введения поправки значительно возрастает. После введения поправки относительные отклонения оценок МП от истинного значения параметров распределения, в зависимости от объема выборки, не превышают 0,3–0,5, в то время как начальные отклонения могут быть больше 2.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. М: Издательство стандартов, 1987.
2. ГОСТ 27.402-95. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Ч. 1. Экспоненциальное распределение. М: Издательство стандартов, 2002.
3. Баталова, З.Г. О точности оценок ресурсов элементов изделий методом максимума правдоподобия при случайном усечении длительностей наблюдений / З.Г. Баталова, Ю.Н. Благовещенский // Надежность и контроль качества. 1979. № 9. С. 12-20.
4. Бурдасов, Е.И. Об оценке параметров нормального распределения по случайно цензурированной выборке / Е.И. Бурдасов, И.Д. Зарифьянц, Н.Н. Дворникова // Надежность и контроль качества. 1978. № 6. С. 10-16.
5. Бурдасов, Е.И. Исследование оценок параметров распределений при анализе результатов незавершенных испытаний / Е.И. Бурдасов, И.Д. Зарифьянц, Н.Н. Дворникова, И.З. Аронов // Надежность и контроль качества. 1980. № 12. С. 47-55.
6. Петрович, М.Л. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ / М.Л. Петрович, М.И. Давидович. М.: Финансы и статистика, 1989. 189 с.
7. Русин, А.Ю. Имитационное моделирование процессов возникновения отказов электрооборудования с целью повышения эффективности системы технического обслуживания и ремонта: дисс. ... канд. техн. наук / А.Ю. Русин. Тверь: ТГТУ, 1999. 214 с.

УДК 621.313.333

А.Г. Савин

Тверской государственной технической университет

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПУСКОВОГО РЕОСТАТА ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Предложен метод расчета пусковой диаграммы и реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором. Предлагаемый метод не накладывает ограничений на величину пусковых моментов и позволяет существенно упростить расчет.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, реостат, пусковая диаграмма, метод расчета.

ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATION OF STARTING RESISTOR FOR ASYNCHRONOUS SLIP RING MOTOR

A method for calculating the starting diagram and rheostat for asynchronous slip ring motor is proposed. The proposed method does not impose any restriction on the starting torque and enables greatly simplify the calculation.

Keywords: asynchronous motor, resistor, starting diagram, method of calculation.

Для расчета пусковой диаграммы и реостата для АД с фазным ротором обычно используются два метода, основанные на линеаризации механической характеристики двигателя. При одном методе характеристики полностью принимаются прямолинейными, что допустимо только при относительно небольших значениях пускового момента. При втором методе, применяемом при больших пусковых моментах, линеаризуются лишь участки характеристик между моментами M_1 и M_2 . Этот метод чисто графический, требующий больших затрат труда и времени [1].

Предлагаемый метод не накладывает ограничений на величину пусковых моментов и позволяет существенно упростить расчет. Для расчета требуются параметры естественной характеристики двигателя: n_0 , s_{ek} и M_k , которые находятся по каталожным данным двигателя. Обычным образом определяются пусковые моменты M_1 и M_2 . Далее вычисляется их относительная величина

$$\beta_1 = M_1/M_k, \quad \beta_2 = M_2/M_k.$$

Переписываем уравнение характеристики двигателя (формулу Клосса) в виде:

$$s/s_k + s_k/s = 1/\beta.$$

В этом уравнении за неизвестное принимаем сначала s_k , потом s . Решая уравнения, получаем:

$$s_k = s \left(\frac{1}{\beta} + \sqrt{\left(\frac{1}{\beta}\right)^2 - 1} \right) = As, \quad (1)$$

$$s = s_k \left(\frac{1}{\beta} - \sqrt{\left(\frac{1}{\beta}\right)^2 - 1} \right) = B s_k. \quad (2)$$

Будем связывать уравнение (1) с величиной β_1 , а уравнение (2) – с величиной β_2 .

Поскольку на всех реостатных характеристиках пусковой диаграммы значения моментов β_1 и β_2 должны быть одинаковы, коэффициенты A и B в уравнениях (1) и (2) являются постоянными числами. Они могут быть вычислены по приведенным выше уравнениям либо определены по табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов A и B

β	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
A	1,595	1,797	2,000	2,215	2,449	2,708	3,000
B	0,627	0,557	0,500	0,451	0,408	0,369	0,333
β	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25
A	3,337	3,732	4,207	4,791	5,534	6,513	7,873
B	0,300	0,268	0,238	0,209	0,181	0,154	0,127

Предположим, что коэффициенты A и B нам известны. Тогда из уравнения (1) может быть определено скольжение s_{e1} на естественной характеристике, соответствующее моменту M_1 :

$$s_{e1} = s_{ek} / A. \quad (3)$$

Точно такое же скольжение будет в точке переключения на последней реостатной характеристике при β_2 . Отсюда, воспользовавшись уравнением (2), находим: $s_{mk} = s_{ek} / AB$.

Это соотношение справедливо для критических скольжений любых двух последовательных характеристик. Отсюда находим критическое скольжение для первой реостатной характеристики:

$$s_{1k} = s_{ek} / (AB)^m, \quad (4)$$

где m – число ступеней пускового реостата.

Скольжение s_{e1} на первой реостатной характеристике, соответствующее моменту β_1 , очевидно равно единице. Воспользовавшись уравнениями (1) и (4), получаем основное расчетное соотношение:

$$s_{ek} / A^{m+1} B^m = 1.$$

Для дальнейшего расчета необходимо задаться числом ступеней реостата m и каким-либо коэффициентом. Например, задаемся значениями β_1 и A и вычисляем: $B = (1/A)^m \sqrt{s_{ek}/A}$; $\beta_2 = 2B / (B^2 + 1)$.

Необходимо проверить выполнение условия: $M_2 = \beta_2 M_K \geq 1,1 M_C$.

Если задаемся β_2 и B , то $A = (1/B)^{m+1} \sqrt{s_{ek} B}$; $\beta_1 = 2A/(A^2 + 1)$.

Проверяем выполнение условия: $M_1 = \beta_1 M_K \leq M_{доп}$.

Определив коэффициенты, по приведенным выше формулам рассчитываем координаты всех точек пусковой диаграммы и определяем критические скольжения для всех реостатных характеристик.

Для вычисления сопротивлений реостата используем известное соотношение

$$s_{ek}/s_{nk} = r_p/R_{nk},$$

где r_p – сопротивление обмотки ротора; R_{nk} – полное сопротивление роторной цепи на n -ой реостатной характеристике.

Воспользовавшись соотношением (4), находим полное сопротивление на первой реостатной характеристике и сопротивление первой ступени как: $R_1 = r_p/(AB)^m$; $r_1 = r_p(1-AB)/(AB)^m = R_1(1-AB)$.

Сопротивления на остальных характеристиках рассчитываются по тем же формулам, но для каждой следующей характеристики показатель степени уменьшается на 1.

Результаты расчета удобно свести в табл. 2.

Таблица 2. Расчет пусковой диаграммы и реостата

	s_1	$s_k = As_1$	$s_2 = Bs_k$	R_n	r_n	ω_n
1-я реост.	l	A	AB	r_p/A^3B^3	$R_1(1-AB)$	$\omega_0(1-AB)$
2-я реост.	AB	A^2B	A^2B^2	r_p/A^2B^2	$R_2(1-AB)$	$\omega_0(1-A^2B^2)$
3-я реост.	A^2B^2	A^3B^2	A^3B^3	r_p/AB	$R_3(1-AB)$	$\omega_0(1-A^3B^3)$
Естеств.	A^3B^3	A^4B^3		r_p		

В таблице обозначено: s_1 – скольжение на реостатных характеристиках при моменте β_1 ; s_2 – скольжение при моменте β_2 , s_k – критическое скольжение соответствующей характеристики; R_n , r_n – полное сопротивление роторной цепи на соответствующей характеристике и сопротивление ступени реостата, ω_n – частота вращения в точке переключения при скольжении s_2 .

Рассмотрим изложенную методику на примере.

Рассчитаем пусковую диаграмму и реостат для двигателя МТН 511-8. Номинальные данные: $P_H = 28$ кВт; $n_H = 705$ об/мин; $M_{макс} = 1\,000$ Нм; $U_{2H} = 281$ В; $I_{2H} = 64$ А. Вычисляем:

$$M_H = 379 \text{ Нм}; s_H = 0,0638; s_k = 0,304; r_p = 0,152 \text{ Ом}.$$

1. При расчете реостата принимаем число ступеней $m = 3$ и $\beta_1 = 0,85$. По табл. 1 находим $A = 1,796$. Далее вычисляем:

$$B = 0,308; \beta_2 = 0,563; AB = 0,553; 1/AB = 1,808.$$

Последующий расчет сводим в табл. 3.

Таблица 3. Расчет пусковой диаграммы. Вариант 1

	s_1	$s_k = As_1$	$s_2 = Bs_k$	R_n , Ом	r_n , Ом	n_n , об/мин
1-я реост.	1	1,796	0,553	0,899	0,402	328
2-я реост.	0,553	0,993	0,306	0,497	0,222	520
3-я реост.	0,306	0,550	0,169	0,275	0,123	623
Естеств.	0,169	0,304		0,152		

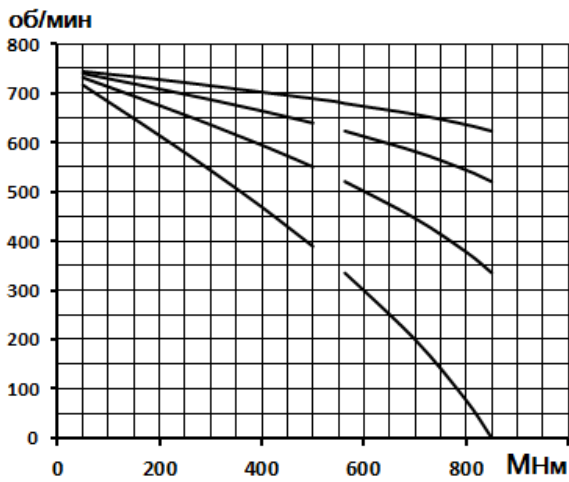
2. Рассчитаем реостат для того же двигателя, но при условиях: $m = 2$; $\beta_2 = 0,5$. По табл. 1 находим $B = 0,2679$.

Вычисляем: $A = 1,6187$; $\beta_1 = 0,894$; $AB = 0,434$; $1/AB = 2,304$; $(1/AB)^2 = 5,309$. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

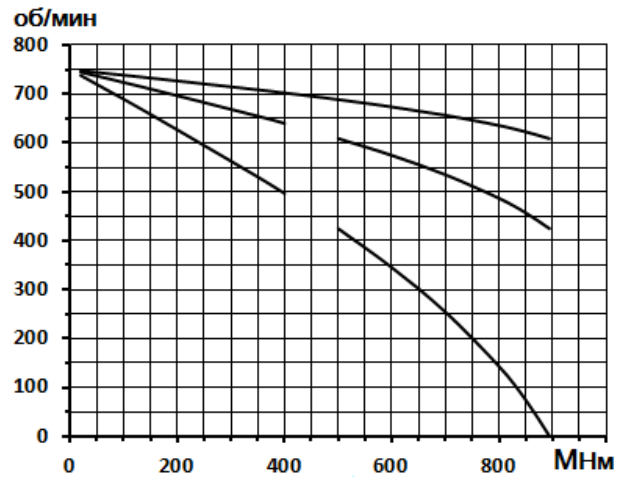
Таблица 4. Расчет пусковой диаграммы. Вариант 2

	s_1	s_k	s_2	R_n	r_n	n_n
1-я реост.	1	1,6187	0,434	0,808	0,457	424
2-я реост.	0,434	0,702	0,188	0,351	0,199	609
Естеств.	0,188	0,304		0,152		

По данным табл. 3 и 4 в программе EXCEL рассчитаны и построены пусковые диаграммы (рисунок).



а



б

Пусковые диаграммы при: а – $m = 3$; б – $m = 2$

Библиографический список

1. Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. М.: Энергия, 1977. 432 с.

УДК 621.311:658.26

Р.З. Диланян

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ КАК ОСНОВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРУППОВЫХ ОПЕРАЦИЙ

В статье излагается новый подход к автоматизированному проектированию групповых технологий, основанный на введенном понятии «производственная среда», характеризующаяся своими атрибутами – элементами. Параметры атрибутов определяют состояние производственной среды в фиксированные интервалы времени. Показаны модели производственной среды и общие модели проектирования групповых технологических процессов на основе «размытых» технологических операций.

Ключевые слова: групповой технологический процесс, технологическая операция, производственная среда, автоматизированное проектирование.

MODEL OF A PRODUCTION ENVIRONMENT AS A BASIS FOR DESIGNING GROUP OPERATIONS

The article presents a new approach to automated design group technology, based on the introduced notion of the «working environment» characterized by its attributes elements. Attribute parameters define the state of the environment in the fixed time intervals. The model of the working environment and general design model of group processes on the basis of «blurry» technological operations are shown.

Keywords: group process, operation, environment, computer-aided design.

Традиционные методы проектирования групповых технологических процессов исходят из понимания неизменности производственной системы и производственной ситуации, сложившейся в ней [1–4]. Такой подход не отражает реалии современных производственных систем, отличающихся высокой динамичностью и малой инерционностью при их перестройке. Одним из ключевых понятий таких производственных систем является «производственная среда».

Производственная среда и ее элементы. Под производственной средой P понимают множество технологических составляющих производственной системы, требующих проведения наладочных работ при переходе к выполнению очередной операции. Такими составляющими элементами \mathcal{E} производственной среды (ЭПС) являются рабочие места, станки, приспособления, режущие и вспомогательные инструменты, кассеты и схваты роботов гибких производственных систем, т.е. $P : \{\mathcal{E}\}$.

Каждый ЭПС описывается некоторым набором технологических характеристик X , определяющих возможность совместного использования с другим: $\mathcal{E}_u : \{X\}_u$. Технологическая операция O_i выделяет в производственной среде множество ЭПС, необходимых для ее выполнения:

$O_i : \{\mathcal{E}\}_i; \{\mathcal{E}\}_i \subset \{\mathcal{E}\}$, следовательно, объектами моделирования являются производственная среда (ПС) и множество технологических операций.

С целью оценки возможности совместного использования ЭПС в той или иной операции в рассматриваемый момент времени T необходимо учесть производственную ситуацию Ψ^T . При этом можно выделить два вида состояния ЭПС. Первый вид состояния Ψ_p^T характеризует наличие и работоспособность ЭПС в ПС в рассматриваемый момент времени. Например, ЭПС может находиться в ремонте, отсутствовать в производственной системе и т.д. Второй вид состояния Ψ_o^T отражает использование ЭПС при выполнении той или иной операции (например, станок может находиться в процессе обработки других заготовок или быть свободным).

Таким образом, состояние ПС φ^T в интервале времени T описывается четырьмя составляющими:

$$\varphi^T = \langle P, \{O\}^T, \Psi_p^T, \Psi_o^T \rangle.$$

При моделировании ПС в разные моменты времени меняется множество операций и производственная ситуация.

Математически ПС представляют в виде взвешенного ориентированного графа $P(\mathcal{E}, R)$, вершинами которого является множество ЭПС $\{\mathcal{E}\}$, а дугами (ветвями) – множество технологических взаимоотношений $\{R\}$, отражающих отношения между ЭПС, устанавливаемые в процессе выполнения наладки и переналадки (рис. 1).

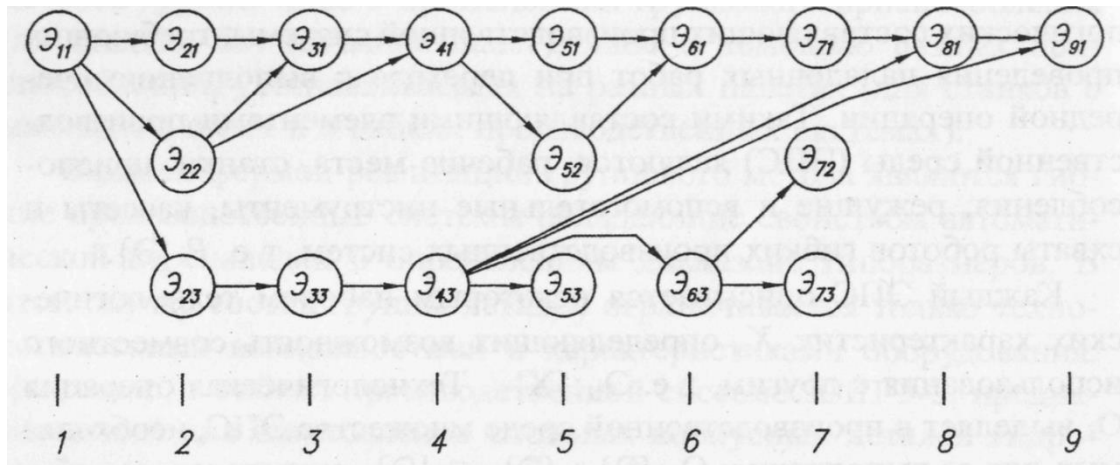


Рис. 1. Фрагмент графа производственной среды $P(\mathcal{E}, R)$.

Цифры 1–9 в индексах ЭПС – уровни графа, обозначающие соответственно: участки (1); рабочие места (2); станки (3); приспособления (4); зажимные элементы (5); режущие инструменты (6); вспомогательные инструменты (7); схваты (8) и кассеты (9)

Первый вид отношений R_p характеризует возможность совместной наладки ЭПС и ее трудоемкость:

$$R_p(\mathcal{E}_u, \mathcal{E}_v) = \begin{cases} \infty, & \text{если } \mathcal{E}_v \text{ не применяется вместе с } \mathcal{E}_u; \\ T_{uv}, & \text{если трудоемкость наладочных работ равна } T_{uv}; \\ 0, & \text{если затрат времени на наладочные работы не требуется.} \end{cases}$$

Второй вид отношений R_o устанавливает принадлежность каждого ЭПС к той или иной операции, например, для i -й технологической операции

$$R_{o_i}(\mathcal{E}_u, \mathcal{E}_v) = \begin{cases} \infty, & \text{если } \mathcal{E}_v \notin \{\mathcal{E}\}_i; \\ 0, & \text{если } \mathcal{E}_u \in \{\mathcal{E}\}_i. \end{cases}$$

Таким образом, на графе $P(\mathcal{E}, R)$ выделяется подграф каждой технологической операции $G_i(\mathcal{E}, R)$, причем $G_i(\mathcal{E}, R) \in P(\mathcal{E}, R)$.

Третий и четвертый вид отношений отражает производственную ситуацию Ψ :

$$R_{\Psi_p}(\mathcal{E}_u, \mathcal{E}_v) = \begin{cases} \infty, & \text{если } \mathcal{E}_v \text{ отсутствует или в неработоспособном состоянии;} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

$$R_{\Psi_o}(\mathcal{E}_u, \mathcal{E}_v) = \begin{cases} \infty, & \text{если } \mathcal{E}_v \text{ уже используется в другой операции;} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Таким образом, модель ПС представляет собой систему из ЭПС, взаимосвязи между которыми определяются процессами наладки оборудования. При использовании группового метода выполнение группы технологических операций $\Omega_k : O_1, O_2, O_i \dots O_m$, осуществляется с использованием множества ЭПС групповой операции $Q_k : \{\mathcal{E}\}_k$ при условии, что $\{\mathcal{E}\}_i \subseteq \{\mathcal{E}\}_k$. Если данное условие не обеспечивается, то при выполнении отдельных операций потребуются соответствующая переналадка.

Заключение. Предложенные математические модели производственной среды и ее состояний, характеризующие динамику производственной ситуации и взаимоотношения между элементами $\{\mathcal{E}\}$ позволяют обеспечить создание научно обоснованной методики синтеза групповых технологических операций, дающей возможность повысить производительность технологических процессов.

Библиографический список

1. Митрофанов, С.П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2 т. Т. 2. Проектирование и использование технологической оснастки металлорежущих станков / С.П. Митрофанов, А.Г. Братухин, О.С. Сироткин. М.: Машиностроение, 1992. 435 с.
2. Митрофанов, С.П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2 т. Т. 1. Организация производства / С.П. Митрофанов, А.Г. Братухин, О.С. Сироткин. М.: Машиностроение, 1983. 387 с.
3. Митрофанов, С.П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2 т. Т. 1. Технология и организация группового машиностроительного производства / С.П. Митрофанов, А.Г. Братухин, О.С. Сироткин. М.: Машиностроение, 1992. 411 с.
4. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. М.: Машиностроение, 2001. 227 с.

УДК 621.311:658.26

Г.Б. Бурдо, Н.А. Семенов, И.С. Конькова, А.В. Федотова
Тверской государственной технической университет

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АСУТП СБОРКИ И ОБСЛУЖИВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Приводится анализ принципов проектирования АСУТП сборки и технического обслуживания изделий. Показаны новые принципы создания интеллектуальных АСУТП, характерные для дискретных технологических процессов. Обусловлена необходимость временной и информационной интеграции с САПР ТП и системами поддержки жизненного цикла изделия.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования технологических процессов, искусственный интеллект, жизненный цикл изделия, автоматизированные системы управления технологическими процессами.

PRINCIPLES OF DCS CONSTRUCTION FOR PRODUCTS ASSEMBLY AND MAINTENANCE

An analysis of the design principles of the DCS for products assembly and maintenance is presented. The new principles of creation of intelligent process control systems characteristic for discrete technological processes are shown. The necessity of time and information integration with CAD system and systems of support of the product life cycle is substantiated.

Keywords: system of automated design of technological processes, artificial intelligence, the life cycle of products, automated control systems of technological processes.

Реализация интеллектуальных АСУТП для сборочных процессов единичного и мелкосерийного производства и процессов технического обслуживания (ПСТО) сдерживается отсутствием конкретно сформулированных принципов, учитывающих особенность обслуживаемых объектов, условий их реализации и необходимость информационного обмена между подсистемами предприятия и фирмы. Поэтому, решение данной задачи востребовано современной промышленностью.

Выявление функций АСУТП ПСТО. Рассмотрим действия производственной организации по разработке планов [1–3] и их корректировке (управлению). Процесс планирования состоит из ряда последовательных этапов (рис. 1). Планирование и управление – составляющие единого процесса. Система планов предприятия [1, 4] состоит из трех уровней планов (рис. 2). Стратегический план выражает миссию, цели и задачи организационно-технологической системы, и они непосредственно не связаны с реализацией работ, поэтому его создание не является функцией АСУТП. Тактическое (годовое, квартальное и т.д.), объемное (ОП) и календарное планирование обслуживания изделий (КП), разрабатываемое на основе анализа производственных возможностей предприятия и технологических циклов, уже является задачей АСУТП.

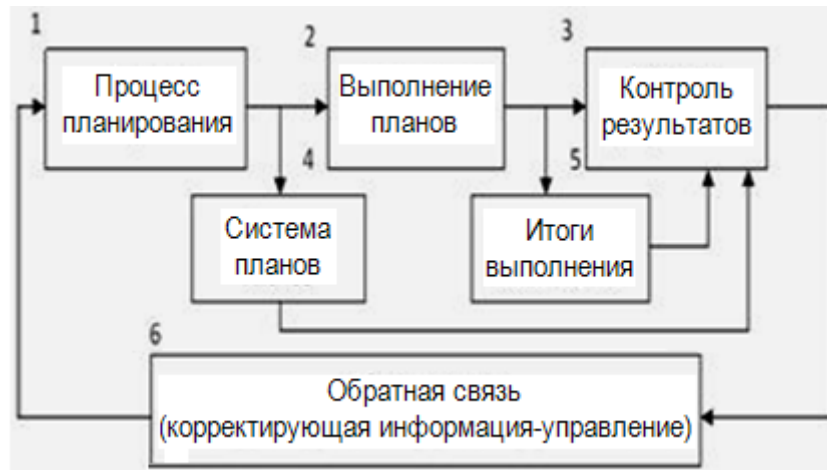


Рис. 1. Взаимосвязь планирования и управления



Рис. 2. Этапы планирования

Оперативное планирование – последний этап планирования, обеспечивающий детализацию производственной программы и ее доведение до производственных подразделений и имеющий задачу обеспечить выполнение заданий в намеченные сроки при рациональном использовании мощностей.

На основании проведенного анализа обозначим функции, выполняемые АСУТП сборочных процессов единичного и мелкосерийного производства и процессов технического обслуживания.

1. Объемное (годовое, квартальное) планирование объемов работ, корректировка планов на основе изменения планов фирмы и календарных планов. Ведется по фирме в целом, а если имеются несколько цехов (производств), то по каждому из них.

2. Календарное планирование (месячное) объемов работ, корректировка планов на основе изменения планов фирмы и календарных планов-графиков.

3. Синтез оперативных планов (календарных план-графиков (КПГ)) очередности выполнения работ, запланированных в технологических процессах сборки или обслуживания (на неделю и сутки), корректировка КПГ на основе диспетчирования. Планирование на больший период нецелесообразно в связи с постоянным уточнением плана и невысокой точностью прогноза.

4. Диспетчирование – регулирование хода выполнения работ путем отслеживания фактических сроков выполнения КПГ, введения регулирующих воздействий и пересчета КПГ.

Разработка структуры АСУТП ПСТО. Можно выделить главенствующие принципы планирования и управления [1, 4–12], излагаемые как единство (1), непрерывность (2), гибкость (3), точность (4), парсипативность (5). Очевидно, что и процедуры в АСУТП должны следовать им. В работах [3, 13] принципы дополнены, уточнены для АСУТП и сформулированы как принципы системного единства и взаимосвязи (6), соответствия иерархии планов и точности управления точности планов организации (7), эвристичности (8), относительной оптимальности (9), участия (10), оперативности (11), комплексности (12).

Рассмотрим реализацию основных принципов. Связи в АСУТП должны реализовываться на горизонтальном уровне (например, балансирование загрузки рабочих в обслуживающих подразделениях) и вертикальном (для реализации единства целей, т.е. управляться системой высшего уровня (подсистема управления АСУТП) и внешней по отношению к ней). Подсистемы в АСУТП рассматриваются по отдельности, и в то же время АСУТП – как целостная система; должны реализовываться временные и информационные связи при построении конфигураций процедур и разработке планов их реализации (1, 6).

С позиций декомпозиции принципы (4, 9) означают, что планы, разрабатываемые в АСУТП, должны постепенно детализироваться (например, планы при календарном планировании (КП) должны быть точнее планов при объемном планировании (ОП)), а также установлены допустимые интервалы отклонений фактических сроков выполнения планов сборки изделий (обслуживания техники) от расчетных. Времена выполнения работ, определяемые подсистемой проектирования технологических процессов сборки (обслуживания), должны уточняться путем введения обратных связей между ней и АСУТП (4, 9). Принцип (2) реализуется путем обновления планов на основе диспетчирования, а (3) – созданием резервов в фактических фондах рабочего времени бригад рабочих и выполнением ими различных видов работ в операциях сборки и обслуживания. Принцип (8) допускает наличие эвристических правил принятия решений в АСУТП. 11-й

принцип предполагает отслеживание и обработку параметров реализуемых планов сборки (обслуживания), т.е. определение фактического состояния в производстве в заданные интервалы времени для уменьшения временной инерционности АСУТП. Принципы (5, 10) реализуются участием персонала в анализе и оценке результатов работы АСУТП (автоматизированный режим). 12-й принцип позволяет рассмотреть задачу управлением работами по сборке (обслуживанию), начиная от создания предпосылок рационального управления АСУТП за счет пропорциональности мощностей обслуживающих подразделений по видам работ, обеспечения временной координации процессов разработки технологий сборки (обслуживания) и работы подсистем АСУТП механической обработки и сборки.

АСУТП, соответствующая выявленным функциям и принципам, приведена на рис. 3.

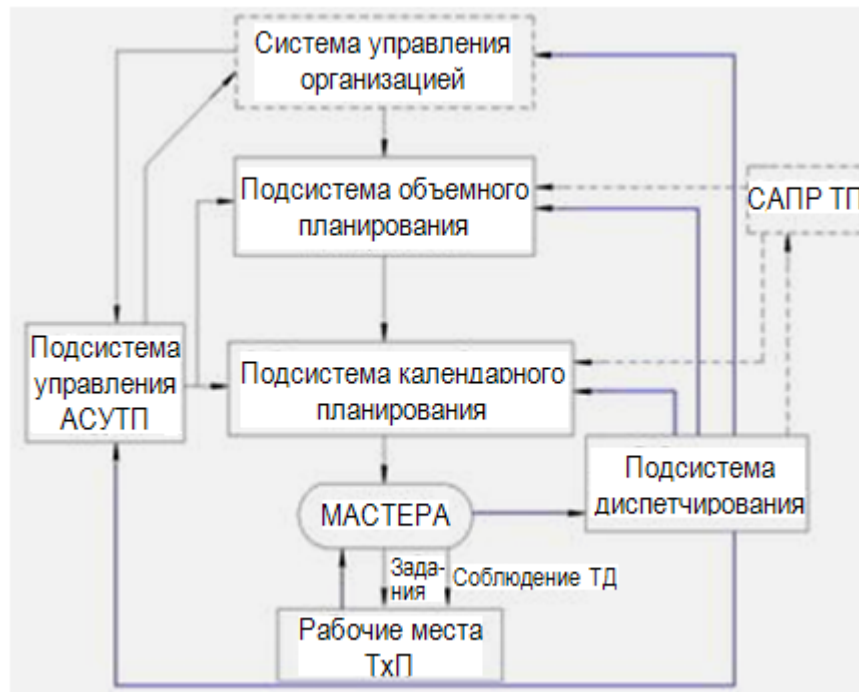


Рис. 3. Структура АСУТП технического обслуживания:
ТхП – технологические подразделения, выполняющие обслуживание;
САПР ТП – подсистема проектирования технологических процессов сборки (обслуживания); ТхП – технологические подразделения

Составляющими современных производственных систем [4, 6, 7, 9, 10] являются всеобщий менеджмент на основе качества (TQM); всеобщий уход за оборудованием (TPM) и система «точно вовремя» (JIT), дающие возможность создания «бережливого производства», обеспечивающего обслуживание техники в заданные сроки. Система JIT обуславливается функционированием АСУТП, которая должна осуществлять принятие решений, направленных на сокращение общего цикла выпуска изделий. Входной информацией для работы АСУТП должны быть: а) планы органи-

зации по номенклатуре собираемых (обслуживаемых) изделий, составленные согласно заключенным договорам (от системы управления организацией (фирмой)); б) данные от САПР ТП по технологическим процессам (структура, квалификационные требования) и трудоемкостям операций по сборке (обслуживанию) изделий.

Заключение. На наш взгляд, реализация указанных принципов позволит повысить интеллектуализацию в имеющихся АСУТП, не нарушая при этом принципиальных моментов функционирования производственных систем. Дальнейшим этапом должна явиться разработка алгоритмов и программ функционирования подсистем АСУТП.

Библиографический список

1. Самойлович, В.Г. Организация производства и менеджмент / В.Г. Самойлович. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 336 с.
2. Егорова, Т.А. Организация производства на предприятиях машиностроения / Т.А. Егорова. СПб.: Питер, 2004. 304 с.
3. Бурдо, Г.Б. Основы построения автоматизированных систем проектирования технологических процессов и сопровождения производства изделий в геофизическом приборостроении: дисс. ... докт. техн. наук. Тверь: ТвГТУ, 2011. 357 с.
4. Акофф, Расселл Л. Теория и практика менеджмента / Расселл Л. Акофф. Издательство Питер, 2002. 448 с.
5. Васильев, В.Н. Организация производства в условиях рынка / В.Н. Васильев. М.: Машиностроение, 1993. 368 с.
6. Ваймерских, С. Всеобщее управление качеством: стратегии и технология, применяемые сегодня в самых успешных компаниях (TQM) / С. Ваймерских, А. Джордж. СПб.: Виктория плюс, 2002. 435 с.
7. Вумек Джеймс, П. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / П. Вумек Джеймс, Т. Джонс Даниел. М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. 473 с.
8. Клевлин, А.И. Организация гармоничного производства, теория и практика: учебное пособие / А.И. Клевлин. М.: Омега-Л, 2003. 360 с.
9. Акофф, Расселл Л. Идеализированное проектирование. Как предотвратить завтрашний кризис сегодня. Создание будущего организации / Расселл Л. Акофф, Джейсон Магидсон, Герберт Дж. Эдисон. Издательство: Баланс Бизнес Букс, 2007. 320 с.
10. Синго, С. Быстрая переналадка: Революционная технология оптимизации производства / С. Синго. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. 344 с.
11. Файоль, А. Общее и промышленное управление / А. Файоль. М.: Издательский дом «МВМ», 2001. 326 с.
12. Гаврилов, Д.А. Управление производством на базе стандартов MRP-11 / Д.А. Гаврилов. СПб.: Питер, 2002. 320 с.
13. Бурдо, Г.Б. Принципы построения автоматизированной системы управления технологическими процессами в многономенклатурных производствах / Г.Б. Бурдо // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2010. № 3(48). С. 113-118.

УДК 621.311:658.26

Г.Б. Бурдо, А.А. Исаев, Н.В. Испирян, С.Р. Испирян
Тверской государственной технической университет

ПРОЕКТИРОВАНИЕ В САПР ТП НА ОСНОВЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИТУАЦИИ

В статье приводится анализ методов проведения технологической подготовки производства изделий в многономенклатурном машиностроении. Показаны информационные модели технологических подразделений и системы управления организацией, обеспечивающие учет динамики технологических подразделений и производственной ситуации при проектировании технологических процессов механической обработки. Предложены принципы построения САПР ТП, позволяющие реализовать предлагаемые информационные модели.

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования технологических процессов, многономенклатурное машиностроительное производство, искусственный интеллект, единое информационное пространство.

DESIGN IN CAD SYSTEM BASED ON RECOGNITION OF THE PRODUCTION SITUATION

The article presents the analysis of the methods of technological preparation of the manufacture in multiproduct engineering. Information models of technological divisions and the management systems of the organization providing the account of dynamics of technological divisions and an industrial situation at designing of technological processes of machining are shown. Principles of CAD system construction, allowing the realization of this information models, are offered.

Keywords: system of automated design of technological processes, multiproduct machine-building manufacture, an artificial intellect, common information space.

Известно, что особенности единичного и мелкосерийного производства, обусловленные сжатыми сроками на выполнение одновременно большого числа контрактов, предопределяют упрощенное проведение технологической подготовки производства (в том числе и наиболее важной и трудоемкой ее задачи – проектирование технологических процессов механической обработки) и, по существу, выполнение ее рабочими и мастерами.

Поэтому качество спроектированных технологий, наряду с конструкцией изделий, определяющих конкурентоспособность продукции, оставляют желать лучшего. Принципиальные затруднения возникают и при внедрении оборудования с числовым программным управлением (чисто инженерная область деятельности), систем управления технологическими процессами (отсутствие точных данных по временам выполнения операций).

Следовательно, разрешение противоречия между качеством технологической подготовки производства и весьма ограниченными временными периодами ее выполнения важно для динамичных производственных систем (ПС) многономенклатурного машиностроительного производства (МНП).

Принципы проектирования технологических процессов в динамичных производственных системах. Одним из наиболее эффективных методов разрешения указанного противоречия является разработка и внедрение автоматизированных систем проектирования технологических процессов (САПР ТП), построенных на определенных принципах [1].

Исходными данными для проектирования технологий в САПР ТП являются: 1) функция технологического процесса (ТПр) φ ($\varphi: C_o \rightarrow C_k$), где C_o , C_k – информационные описания заготовки и готовой детали; 2) программа выпуска N ; 3) календарные сроки выпуска детали; фактическое состояние ТП. В функции φ известной является информационная модель готового изделия (детали) C_k [2, 3]. Известны и технические ограничения, накладываемые производственными системами (ПС) [3–5]: методы получения заготовок, методы обработки поверхностей деталей, оборудование в ПС, средства технологического оснащения и т.д.

Следует отметить, что фактическое состояние и изменения в ПС должны находить отражение в видоизменении алгоритмов проектирования. К сожалению, большинством авторов учет фактического состояния в ПС сводится к корректировке баз данных (малодинамичный параметр) и не учитывает организационные аспекты (высокодинамичный атрибут).

Это связано с тем, что задача проектирования технологий не трактовалась как *организационно-технологическая*, не рассматривалась возможность создания предпосылок эффективного управления ПС на этапе технологической подготовки производства.

Различие конструкторско-технологических характеристик деталей, изготавливаемых на предприятиях МНП, разнообразный состав оборудования, средств технологического оснащения, непредсказуемые состояния технологических подразделений (ТП) по загрузке, фактической численности рабочих, появлению новых заказов и т.п., приводит нас к пониманию того факта, что проектирование ТПр является малоформализованной, многовариантной *организационно-технологической* задачей, решаемой в условиях информационной неопределенности.

В настоящей работе показан на основе сформулированных ниже принципов подход к созданию САПР ТП, способных к перестройке алгоритмов на основе обобщения опыта проектирования и оценки текущей ситуации в ТП. Для оценки текущей ситуации необходимо в качестве параметров фактического состояния ТП ($ТП^\phi$) использовать загрузку оборудования по типам и группам.

Для реализации возможности обобщения опыта проектирования необходимо сравнение фактического состояния изделия $C_{k\phi}$ после реализации технологии с информационной моделью этого состояния изделия C_k ; это при неоднократном их совпадении позволит применять в САПР ТП накопленные и обобщенные решения.

Важным является и учет в САПР ТП целевой функции (ЦФ) конкретного изготавливаемого заказа. Авторы [7–10] считают, что ЦФ должна являться минимальная технологическая себестоимость C_{\min} . Точка зрения справедлива при устоявшейся номенклатуре выпуска, что нехарактерно для МНП.

Рассмотрим еще две ЦФ – максимальный выпуск изделий за единицу времени (Q_{\max}) и минимум времени цикла выпуска партии деталей (T_{\min}). Различие между Q_{\max} и T_{\min} – второй критерий учитывает временные потери всех видов, а не только подготовительно-заключительное время. При выборе одного из них C_{\min} целесообразно в моделях перевести в технико-экономическое ограничение $C \leq C_3$.

При выборе в качестве целевой функции C_{\min} следует модели дополнить технико-экономическими ограничениями $Q \geq Q_3$ или $T \leq T_3$, где Q_3 и T_3 – заданные величины штучной производительности и времени цикла выпуска изделий.

Таким образом, технические ограничения (ТО), параметры фактического информационного состояния ТП ($ТП^\phi$) и изделия $C_{кф}$, технико-экономические ограничения (ТЭО) представляют собой предлагаемую модель технологических подразделений ($M_{ТП}$), в рамках которой реализуется ТПр и обеспечивается организационно-технологическое проектирование:

$$M_{ТП} = \{ТО, ТП^\phi, C_{кф}, ТЭО\}.$$

Параметры $ПС^\phi$ – загрузка оборудования по типам (группам), определяемая как отношение суммы станкочасов работ, запроектированных на данную группу (тип) оборудования в соответствии с календарным планом, отнесенной к соответствующему месячному фонду времени работы оборудования (по данным от системы управления ТПр).

В свою очередь

$$ТЭО = \{(C \leq C_3) \underset{\vee}{\vee} (T \leq T_3) \underset{\vee}{\vee} (Q \geq Q_3)\},$$

где “ $\underset{\vee}{\vee}$ ” – знак строгой дизъюнкции.

Отдельного разговора заслуживает модель системы управления организацией (СУО), в рамках которой формируется целевая функция. Как правило, она при проектировании ТПр не указывается вообще либо задается достаточно обще. Это приводит к неопределенности при технологической подготовке производства, к сбоям в производстве и, как следствие, к срывам поставок.

Предложена информационная модель принятия решений в СУО, в которой на основании анализа параметров производственной ситуации: ожидаемых циклов изготовления деталей, сроков выполнения договорных обязательств, вероятности появления новых контрактов, производствен-

ных мощностей и станкоемкостей (или трудоемкостей) изделий, методом нечеткого вывода синтезируется целевая функция конкретного заказа.

Учитывая динамичность ПС, целевая функция на основе реализации информационных связей с автоматизированной системой управления технологическими процессами (АСУТП) может видоизменяться.

Для описания информационного взаимодействия СУО и АСУТП использована темпоральная логика Алена.

Сформулированы основные принципы [1, 2] при разработке САПР ТП для МНП:

1. Учет изменения параметров, описывающих фактическое состояние в технологических подразделениях.
2. Синтез и модификация целевой функции на основе анализа параметров производственной ситуации.
3. Накопление опыта проектирования (обучение).
4. Реализация системного подхода, рассматривающего САПР ТП как иерархическую систему, а САПР ТП как агент ПС.
5. Интеграция в единое информационное пространство с АСУТП.

Принципы 1 и 2 обеспечивают реализацию элементов искусственного интеллекта при создании САПР ТП.

Заключение. В Тверском государственном техническом университете при разработке программных средств САПР ТП реализован показанный в настоящей работе методологический подход.

Опыт эксплуатации программных средств [8, 9] показал возможность их быстрого реагирования на изменение производственной ситуации в обрабатывающих подразделениях, обеспечил на 60–80% сокращение времени разработки технологических процессов и управляющих программ для станков с ЧПУ, равномерную загрузку оборудования по времени и практически исключил случаи невыполнения контрактов.

Библиографический список

1. Бурдо, Г.Б. Теоретические основы комплексной автоматизированной системы проектирования и управления технологическими процессами в многономенклатурном производстве / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия технические науки. 2010. № 4(127). С. 44-54.
2. Бурдо, Г.Б. Повышение эффективности управления технологическими подразделениями в условиях единичного и мелкосерийного производств / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх // Вестник Донского ГТУ. 2009. Т. 9. № 4. С. 659-666.
3. Цветков, В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В.Д. Цветков. Минск: Наука и техника. 1979. 264 с.
4. Горанский, Г.К. Автоматизация технического нормирования работ на металлообрабатывающих станках с помощью ЭВМ / Г.К. Горанский, Е.В. Владимиров, Л.Н. Ламбин. М.: Машиностроение, 1970. 224 с.
5. Кондаков, А.И. САПР технологических процессов / А.И. Кондаков. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 272 с.

6. Горанский, Г.К. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / А.Г. Ракович, Г.К. Гаранский, Л.В. Губич. Минск: ИТК АН Беларуси, 1997. 276 с.

7. Евгеньев, Г.Б. Интеллектуальные системы проектирования / Г.Б. Евгеньев. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 334 с.

8. Программа для ЭВМ № 2011612834. Управление технологическими процессами / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, А.Н. Баженов; зарег. в реестре программ для ЭВМ 08.04.11.

9. Программа для ЭВМ № 2010614613. Моделирование размерной структуры технологического процесса / Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, А.Н. Баженов; зарег. в реестре программ для ЭВМ 13.06.10.

10. Лавров, А.В. Использование программной среды «FlowVision» в качестве виртуальной лаборатории при проведении проектных расчетов узла поджига для машин термической резки металлов / А.В. Лавров, Д.А. Зоренко // САПР и графика. 2007. № 4. С. 32-36.

УДК 621.891:531.43

Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов, В.Г. Прохоров
Тверской государственной технической университет

ВЫБОР ПОСАДОК С НАТЯГОМ

В статье изложены основные факторы, необходимые для выбора посадки с натягом. Приведена последовательность расчета с использованием соответствующих математических выражений.

Ключевые слова: посадки с натягом, несущая способность соединения, механические и адгезионные характеристики материалов, эквивалентные параметры шероховатости.

PRESSURE COUPLING SELECTION

The article describes the main factors which are necessary for a selection of a pressure coupling. The calculation procedure using the appropriate mathematical expressions has been presented.

Keywords: pressure coupling, joint bearing capacity, mechanical and adhesive properties of materials, the equivalent roughness parameters.

Соединения с натягом относятся к неразъемным соединениям деталей машин. Ввиду простоты конструктивного оформления, высокой технологичности и надежности в работе, они широко используются в технике. Надежность таких соединений прежде всего зависит от величины натяга, по величине которой выбирается посадка.

Исходными данными для решения задачи являются осевое усилие $P_{ос}$ или крутящий момент $M_{кр}$, обеспечивающие заданную несущую способность соединения; размеры соединяемых деталей (d_H, d_1, d_2 и l); механические и адгезионные характеристики материалов ($H, E_\sigma, \mu_B, E_a, \mu_a, \tau_o$

и β); эквивалентные параметры шероховатости (b , v , r , R_{\max} , r_1 и r_2), определенные с учетом волнистости [1].

Последовательность расчета следующая. Из выражений

$$P_{oc} = \frac{\pi \cdot d_n^2 \cdot l \cdot g}{n_3} \cdot \left[\frac{\tau_o (1 + \bar{k}_n^{-1/2})}{H} + \beta + 1,4 \cdot J \cdot H \sqrt{k_{fg} \cdot (\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2})} \right], \quad (1)$$

$$P_{oc} = \frac{\pi \cdot d_n^2 \cdot l \cdot g}{2 \cdot n_3} \cdot \left[\frac{\tau_o (1 + \bar{k}_n^{-1/2})}{H} + \beta + 1,4 \cdot J \cdot H \sqrt{\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2}} \right], \quad (2)$$

с учетом [1]

$$q_c = \frac{H \cdot b}{1 + \bar{k}^{-1/2}} \cdot \left[\frac{v \cdot d \cdot (\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2})}{16 \cdot r \cdot R_{\max}} \right]^v \quad (3)$$

определяется математическое ожидание степени нагружения выступов \bar{k}_H :

при заданном осевом усилии

$$\bar{k}_H = \frac{n_3 \cdot P_{oc} (\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2})^{1-v}}{\pi \cdot d_n \cdot l \cdot b \cdot H \cdot f_{oc}} \cdot \left(\frac{16 \cdot r \cdot R_{\max}}{v \cdot d_{кр}^2} \right)^v; \quad (4)$$

при заданном крутящем моменте

$$\bar{k}_H = \frac{2 \cdot n_3 \cdot M_{кр} (\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2})^{1-v}}{\pi \cdot d_n^2 \cdot l \cdot b \cdot H \cdot f_{кр}} \cdot \left(\frac{16 \cdot r \cdot R_{\max}}{v \cdot d_{кр}^2} \right)^v, \quad (5)$$

где f_{oc} и $f_{кр}$ – коэффициенты трения при относительном сдвиге деталей в осевом и окружном направлениях

$$f_{oc} = \frac{\tau_o \cdot (1 + \bar{k}_n^{-1/2})}{H} + \beta + 1,4 \cdot J \cdot H \cdot \sqrt{k_{fg}^{-1} \cdot (\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2})},$$

$$f_{кр} = \frac{\tau_o \cdot (1 + \bar{k}_n^{-1/2})}{H} + \beta + 1,4 \cdot J \cdot H \cdot \sqrt{k_{fg} \cdot (\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2})}.$$

При решении уравнений (4) и (5) используется метод последовательных приближений.

По известному значению математического ожидания степени нагружения выступов \bar{k}_H находится абсолютное сближение:

$$\varepsilon = \frac{v \cdot d_{кр}^2 \cdot (\bar{k} + \bar{k}^{1/2})}{16 \cdot r \cdot R_{\max}}$$

и среднее номинальное давление q из (3).

Ввиду того, что $\varepsilon = \alpha / R_{\max}$, имеем:

$$\alpha = v \cdot d_{кр}^2 (\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2}) / 16 \cdot r.$$

Когда вал выступает за торцы втулки, распределение давления по длине сопряжения становится неравномерным, возрастая по мере приближения к торцам соединения. Неравномерность давления

учитывается введением безразмерного коэффициента χ , который зависит от отношения d_1/d_n и $1/d_n$ [2].

Введя коэффициент χ в выражение (3), получим:

$$q = \frac{\chi \cdot b \cdot H}{1 + \bar{k}^{-1/2}} \cdot \left[\frac{v \cdot d_{кр}^2 \cdot (\bar{k}_n + \bar{k}_n^{1/2})}{16 \cdot R_{\max}} \right]^v. \quad (6)$$

С учетом найденных значений α и q рассчитываем натяг:

$$\Delta = 2 \cdot \alpha + q \cdot d_n \cdot \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right),$$

который принимается за минимальный.

По нему подбирается ближайшая посадка, согласно которой устанавливаются наименьший $\Delta_{нм}^{табл}$ и наибольший $\Delta_{нб}^{табл}$ табличные натяги.

Проверяется прочность соединяемых деталей при наибольшем табличном натяге. Для этого из уравнения

$$k_h = \frac{2^{4 \cdot v - 6 - \frac{1}{v}} \cdot [8 \cdot r \cdot \Delta - v \cdot d_{кр}^2 \cdot (\bar{k}_h + \bar{k}_h^{1/2})] \cdot \pi \cdot r^{v-1} \cdot R_{\max}^v}{b \cdot v \cdot P_{кр} \cdot d \cdot [v \cdot d_{кр}^2 \cdot (\bar{k}_h + \bar{k}_h^{1/2})]^{v-1} \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right) k_{cn}}$$

при $\Delta = \Delta_{нб}^{табл}$ находится математическое ожидание степени нагружения выступов \bar{k}_n , а затем по (6) номинальное давление q_{\max} . Прочность деталей соединения обеспечивается, когда $q_{\max} < q_{дон}$. В этом случае отсутствуют пластические деформации материала деталей. Допускаемое давление на сопряженных поверхностях вала и втулки определяется по формулам

$$q_{\varepsilon} = \frac{P_{ос} \cdot n}{\pi \cdot d \cdot l \cdot f_1}, \quad q_{\varepsilon} = \frac{2 \cdot M_{кр} \cdot n}{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot f_2}.$$

Условные обозначения: d_n – диаметр сопряжения деталей в соединениях с натягом; d_1 – внутренний диаметр охватываемой детали; d_2 – внешний диаметр охватывающей детали; l – длина сопряженных деталей в соединениях с натягом; H – предельное давление текучести или предельная твердость; E – модуль упругости контактирующих деталей (индекс 1 относится к охватываемой детали, 2 – к охватывающей детали); μ – коэффициент Пуассона; β – коэффициент сжатия эпюра давления в результате деформирования неровностей шероховатости; b, v – параметры кривой опорной поверхности профиля шероховатости; R_{\max} – максимальная высота неровностей (расстояние от линии вершин до линии впадин); r_1 и r_2 – радиусы вершин выступов в сечениях, расположенных параллельно и перпендикулярно следам обработки; q_c – среднее номинальное давление в

стыке цилиндрических деталей; n_3 – коэффициент запаса прочности, вводимый с целью компенсации возможных погрешностей расчета ($n_3 = 1, 2$); k_{fg} – коэффициент, учитывающий влияния расположения следов обработки относительно направления сдвига деталей на величину деформационной составляющей, равной $k_{fg} = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}$.

Библиографический список

1. Рогозин, Г.И. Расчет и выбор посадок с натягом / Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2010. Вып. 3. С. 161-168.
2. Михин, Н.М. О связи площади касания и сближения при неподвижном и скользящем контактах / Н.М. Михин // Трение твердых тел. М.: Наука, 1964. С. 62-65.

УДК 621.874

В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, С.А. Потапов, П.Ю. Калабин
Тульский государственный университет

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ГЛАВНЫХ БАЛОК МОСТОВЫХ КРАНОВ

Выполнен параметрический синтез пролетных балок мостовых кранов на основе многовариантного анализа их геометрических параметров и совмещения проектного и проверочного расчетов.

Ключевые слова: мостовой кран, пролетная балка, металлоемкость, оптимизация, параметры сечения.

SEARCH OF THE OPTIMUM SIZES OF CROSS SECTIONS OF BRIDGE CRANE BEAMS

The parametric synthesis of the bridge cranes span beams on the basis of multivariate analysis of their geometrical parameters and combination of design and test calculations is carried out.

Keywords: bridge crane, span beam, metal consumption, optimization, section size.

Одним их базовых показателей технологичности конструкции изделия является металлоемкость, характеризующая достижение оптимальных затрат металла на производство изделия. Масса изделия в значительной степени определяет его стоимость (выше 70%), и сокращение расхода металла на 1% ведет к снижению себестоимости изделия до 5%. Особое значение металлоемкость имеет для изделий, конструкция которых включает пространственные металлические конструкции, например, мостовых кранов. Доля металлических конструкций достигает 80% металлоемкости мо-

стового крана, поэтому значительного повышения технологичности конструкции мостового крана можно достичь на основе снижения металлоемкости его металлических конструкций.

В комплекс работ по снижению металлоемкости изделия входит внедрение научно обоснованных методов его расчетов, включая вариантное проектирование и оптимизацию. Однако, как правило, оптимальные металлические конструкции в целом не могут быть получены на основе оптимальных частных решений их элементов, так как в составе металлических конструкций отдельные элементы могут утрачивать оптимальные значения своих параметров [1]. Поэтому разработка метода расчета и проектирования металлических конструкций мостовых кранов с целью совершенствования существующих и создания новых мостовых кранов высокой технологичности и низкой материалоемкости и себестоимости, обладающих конкурентоспособностью на мировом рынке, является актуальной задачей, имеющей существенное значение для машиноведения, систем приводов и деталей машин.

Согласно существующим аналитическим методам оптимизации поперечных сечений пролетных балок [1, 2] рациональное использование материала балки заключается в достижении соответствующего изгибающему моменту определенного момента сопротивления W_x (обеспечение прочности) и достижении соответствующего допускаемому прогибу определенного момента инерции J_x (обеспечение жесткости).

Однако указанный метод оптимизации имеет ряд недостатков, для устранения которых может быть предложена модель поиска оптимальной высоты главной балки исходя из условий прочности h_σ , жесткости h_f и сопротивления усталости $h_{\sigma k}$ [5]:

$$h = \max \{ h_\sigma, h_f, h_{\sigma k} \}.$$

Условие нахождения оптимального значения высоты балки, исходя из условий сопротивления усталости, аналогично нахождению оптимальной высоты h_σ , обеспечивающей выполнение условия прочности, и имеет вид

$$h_{\sigma k} = \sqrt{\frac{3W_{x\sigma k}}{2\delta}}.$$

Требуемый момент сопротивления потенциально наиболее опасного с позиции возникновения усталостного разрушения сечения, соответствующего для пролетных балок мостовых кранов узлу соединения нижнего пояса с вертикальной стенкой в середине пролета, удовлетворяющий условию сопротивления ограниченной долговечности, может быть определен из неравенства

$$W_{\text{срок}} \geq \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{2\sigma_{-1K}(1 - 0,15R) \cdot \left[\sqrt[m]{\frac{\gamma_{dN} N_0}{\xi_e C_e}} \right]^{1/\nu}},$$

где $M_{\text{max}}, M_{\text{min}}$ – соответственно максимальный и минимальный изгибающий моменты в середине пролета, при расчете по первому предельному состоянию; σ_{-1K} – предел выносливости расчетной зоны; R – коэффициент асимметрии цикла; m – показатель степени усталостной кривой; γ_{dN} – коэффициент надежности по усталостной характеристике; N_0 – базовое число циклов; C_e – число циклов крана за срок службы; ξ_e – коэффициент циклического нагружения; ν – расчетный коэффициент. Обозначения в неравенстве приняты согласно [3].

В процессе работы мостового крана пролетные балки подвергаются статической и динамической нагрузкам. Элементы металлических конструкций, в зависимости от их расположения и конструктивного исполнения, воспринимают эту нагрузку неравномерно. Так, если стенки пролетной балки, расположенные симметрично относительно ее продольной оси, работают одинаково, то верхний и нижний пояса работают по-разному. Верхний пояс пролетной балки в процессе эксплуатации мостового крана испытывает дополнительные напряжения вследствие местного давления ходового колеса грузовой тележки.

Когда же мостовой кран эксплуатируется в тяжелом и весьма тяжелом режимах, при выполнении расчета необходимо учитывать сопротивление усталости конструкции, ориентируясь не на предел прочности, а на предел выносливости материала. Так как при растяжении предел выносливости ниже, чем при сжатии, следовательно, к нижнему поясу пролетной балки предъявляются иные требования, чем к верхнему.

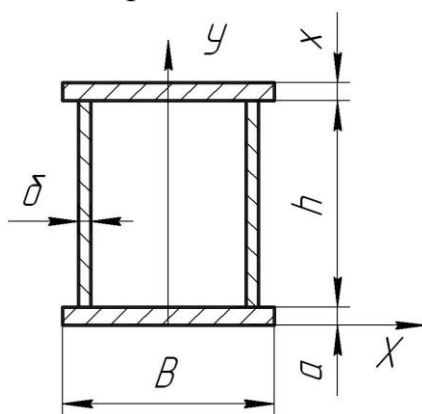


Рис. 1. Поперечное сечение пролетной балки с поясами разной толщины

Для повышения технологичности металлических конструкций мостовых кранов следует проектировать пролетные балки с поясами разной толщины (рис. 1).

Существующая аналитическая методика определения оптимальных параметров поперечного сечения в данном случае становится аналитически нереализуемой, так как не представляется возможным в явном виде установить зависимость площади от моментов сопротивления, что объясняется смещением центра тяжести поперечного сечения в сторону более толстого пояса и увеличением количества неизвестных в расчетных формулах определения моментов инерции и сопротивления сечения.

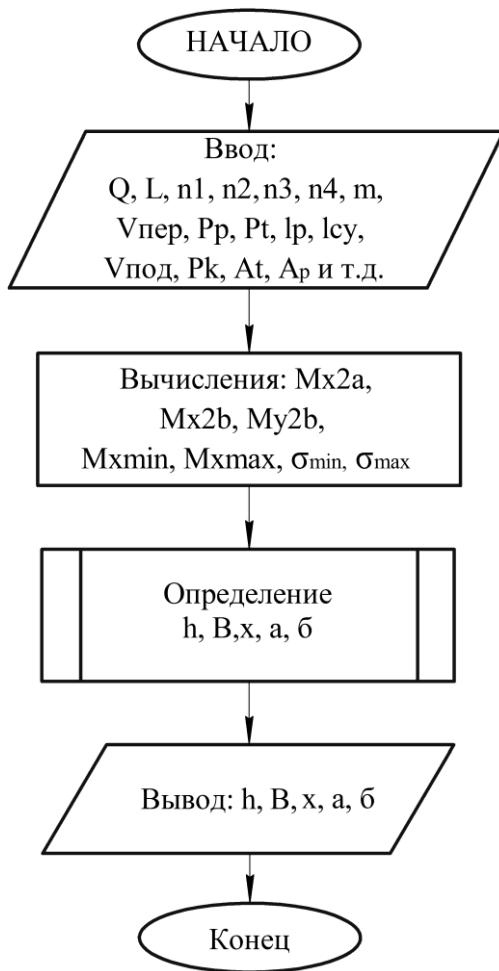


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета параметров поперечного сечения пролетной балки

Для решения задачи повышения технологичности металлических конструкций разработан алгоритм расчета оптимальных параметров поперечного сечения пролетной балки мостового крана (рис. 2).

Алгоритм определения рациональных параметров поперечного сечения представляет собою последовательность операций. Вначале вводятся требуемые характеристики мостового крана: грузоподъемность, пролет, режим работы и т.д. Исходя из этого, определяются дополнительные параметры: коэффициенты толчков, динамичности и т.д. Далее рассчитываются нагрузки, действующие на металлическую конструкцию. После определения нагрузок вводятся ограничения, выполнение которых необходимо для обеспечения требуемой прочности, жесткости, и учитывающие технологию изготовления пролетных балок. Затем запускается программный модуль вычисления оптимальных массогабаритных показателей. Особенностью данного алгоритма является то, что в него введен дополнительный параметр – толщина верхнего пояса, ввиду

наличия в нем дополнительных напряжений, а также то, что расчет оптимальных параметров поперечного сечения пролетной балки производится совместно для всех элементов (высота и толщина стенки, ширина поясов, толщина верхнего пояса, толщина нижнего пояса).

Такой подход позволяет найти оптимальные размеры всего сечения пролетной балки, а не отдельных ее параметров. Работа программы заканчивается выводом параметров поперечного сечения пролетной балки, обеспечивающих минимум целевой функции.

Данный алгоритм реализован в системе автоматизированного проектирования и расчета *PTC Mathcad 14*. Реализованный в этом программном продукте метод конечных разностей позволяет решать прямые задачи оптимизации с ограничениями. В нашем случае ищется минимум целевой функции $F(h, B, \delta, x, a) = 2 \cdot h \cdot \delta + B(a + x)$ поперечного сечения пролетной балки при конструктивных и прочностных ограничениях, т.е. $F(h, B, \delta, x, a) \Rightarrow \min$.

В таблице приведены результаты расчетов параметров поперечных сечений пролетной балки режима работы А7.

Значения параметров поперечного сечения главных балок мостовых кранов общего назначения режима работы А6...А7

L/Q, м/Т	5	8	10	12,5	16	20	32	50
10,5	h = 0,65 B = 0,3 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 0,73 B = 0,3 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 0,88 B = 0,37 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 0,92 B = 0,38 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,1 B = 0,4 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,19 B = 0,42 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,23 B = 0,45 x = 0,01 a = 0,006 δ = 0,006	h = 1,3 B = 0,49 x = 0,01 a = 0,008 δ = 0,008
16,5	h = 0,792 B = 0,33 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 0,96 B = 0,33 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,05 B = 0,39 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,1 B = 0,4 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,16 B = 0,44 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,35 B = 0,45 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,5 B = 0,51 x = 0,01 a = 0,006 δ = 0,006	h = 1,5 B = 0,57 x = 0,01 a = 0,008 δ = 0,008
22,5	h = 0,951 B = 0,45 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,123 B = 0,45 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,2 B = 0,45 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,27 B = 0,45 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,4 B = 0,45 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,5 B = 0,64 x = 0,008 a = 0,006 δ = 0,005	h = 1,8 B = 0,67 x = 0,01 a = 0,006 δ = 0,006	h = 1,8 B = 0,75 x = 0,01 a = 0,008 δ = 0,008
28,5	h = 1,14 B = 0,57 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,29 B = 0,57 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,4 B = 0,57 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,46 B = 0,57 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,56 B = 0,57 x = 0,008 a = 0,006 δ = 0,005	h = 1,7 B = 0,7 x = 0,008 a = 0,006 δ = 0,005	h = 1,88 B = 0,8 x = 0,01 a = 0,008 δ = 0,006	h = 2 B = 0,93 x = 0,01 a = 0,008 δ = 0,008
34,5	h = 1,38 B = 0,69 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,44 B = 0,69 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,5 B = 0,69 x = 0,008 a = 0,005 δ = 0,005	h = 1,58 B = 0,69 x = 0,008 a = 0,006 δ = 0,005	h = 1,7 B = 0,69 x = 0,008 a = 0,006 δ = 0,005	h = 1,87 B = 0,75 x = 0,008 a = 0,006 δ = 0,005	h = 2,045 B = 0,89 x = 0,012 a = 0,008 δ = 0,006	h = 2,2 B = 1 x = 0,012 a = 0,008 δ = 0,008

Библиографический список

1. Брауде, В.И. Справочник по кранам: в 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин [и др.]. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. 536 с.
2. Дусье, В.Е. Расчет и проектирование металлических конструкций мостовых кранов: уч. пособие / В.Е. Дусье, Ю.В. Наварский, В.П. Жегульский. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2007. 133 с.
3. Соколов, С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин: уч. пособие для вузов / С.А. Соколов. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.
4. Анцев, В.Ю. Оптимизация металлических конструкций грузоподъемных машин мостового типа / В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, П.Ю. Калабин // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. Вып. 4. С. 18-22.
5. Анцев, В.Ю. Повышение технологичности металлоконструкций пролетных балок мостовых кранов / В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, П.Ю. Калабин // Тяжелое машиностроение. 2013. № 8. С. 10-14.

УДК 621.86/87

В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, А.Д. Горынин
Тульский государственный университет

СИСТЕМА АНАЛИЗА РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ МОСТОВОГО КРАНА

Представлена методика количественной оценки риска возникновения отказа грузоподъемных машин, базирующаяся на логико-вероятностных методах анализа риска и методе экспертных оценок. На ее основе разработана автоматизированная система оценки риска отказа мостового крана.

Ключевые слова: безопасность, мостовой кран, анализ риска, дерево отказов, автоматизация.

SYSTEM OF RISK ANALYSIS OF BRIDGE CRANES FAILURE

A methodology for quantitative estimation of the risk of failure of lifting equipment, based on logic and probabilistic risk analysis techniques and the method of expert estimations, has been presented. On the base of this methodology the automated system for risk assessment of failure of the bridge crane has been developed.

Keywords: safety, bridge crane, risk analysis, failure tree, automation.

До недавнего времени анализ безопасности проводился на основе методологии «абсолютной безопасности». Однако многочисленные техногенные катастрофы показали, что концепция «абсолютной безопасности» неадекватна вероятностной природе аварий.

Таким образом, в сфере практической деятельности произошло осознание того, что абсолютно безопасный промышленный объект создать невозможно. В связи с этим, безопасность предлагается понимать как пре-

бывание анализируемого опасного производственного объекта в условиях приемлемого (допустимого) риска, т.е. расчетный риск, определяемый вероятностными методами, не должен превышать уровень приемлемого (допустимого) риска [1].

Анализ начинается с определения условий работы крана, его состояния и группы режима работы. После чего проводится идентификация опасностей, возникающих при эксплуатации, а именно выявление всех возможных отказов и вызывающих их причин. Далее выбирается наиболее подходящий метод (методы) и на основе данных о статистике отказов оценивается риск отказа каждого узла в отдельности и его вклад в общий риск отказа крана в целом.

В ходе работы были выбраны два метода риск-анализа, наиболее подходящие для кранов. Первый – это метод дерева отказов (*FTA*), строящийся на исследовании нежелательного события. Он позволяет пользователю отыскивать комплекс экстремальных позиций (ответвлений), ведущих к этому нежелательному событию [2], а также позволяет графически отразить причинные связи между различными случайными событиями с учетом логики их взаимодействия. Второй – метод анализа вида, последствий и критичности отказа (*FMECA*) предусматривает, что каждый вид отказа ранжируется с учетом двух составляющих критичности – вероятности (или частоты) и тяжести последствий отказа [3]. Понятие критичности близко к понятию риска и использовано при более детальном количественном риск-анализе. На основании метода *FTA* было построено наиболее полное дерево отказов (рис. 1), отражающее взаимосвязи между конструктивными элементами. Условные обозначения отказов и исходных событий приведены в таблице.

В качестве объекта исследования был выбран мостовой кран. Мостовые краны широко применяются практически во всех отраслях народного хозяйства при технологических, погрузочно-разгрузочных, монтажных, складских и других работах.

Имеющаяся статическая информация по интенсивностям отказов конструктивных элементов, в связи с обезличенностью и отсутствием индивидуального подхода, не позволяет объективно оценить уровень безопасности мостовых кранов. Как известно, степень влияния повреждения или отказа какого-либо элемента на безопасность различна, даже на однотипных по конструктивному исполнению мостовых кранах. Поэтому в работе предполагается применение средств метода *FMECA* [3], а именно экспертных оценок тяжести последствий каждого из отказов. Согласно данному методу членами экспертной комиссии составляются опросные листы для каждого эксперта, с указанием значимых отказов и диапазона (пределы изменения) изменчивости каждого отказа в применяемой 10-балльной шкале. Опросные листы раздаются каждому из экспертов. Эксперты по каждому из внесенных в опросные листы отказу конструктивного эле-

мента в пределах установленного ранее диапазона проставляют фактический балл, характеризующий оценку (вес) данного отказа.

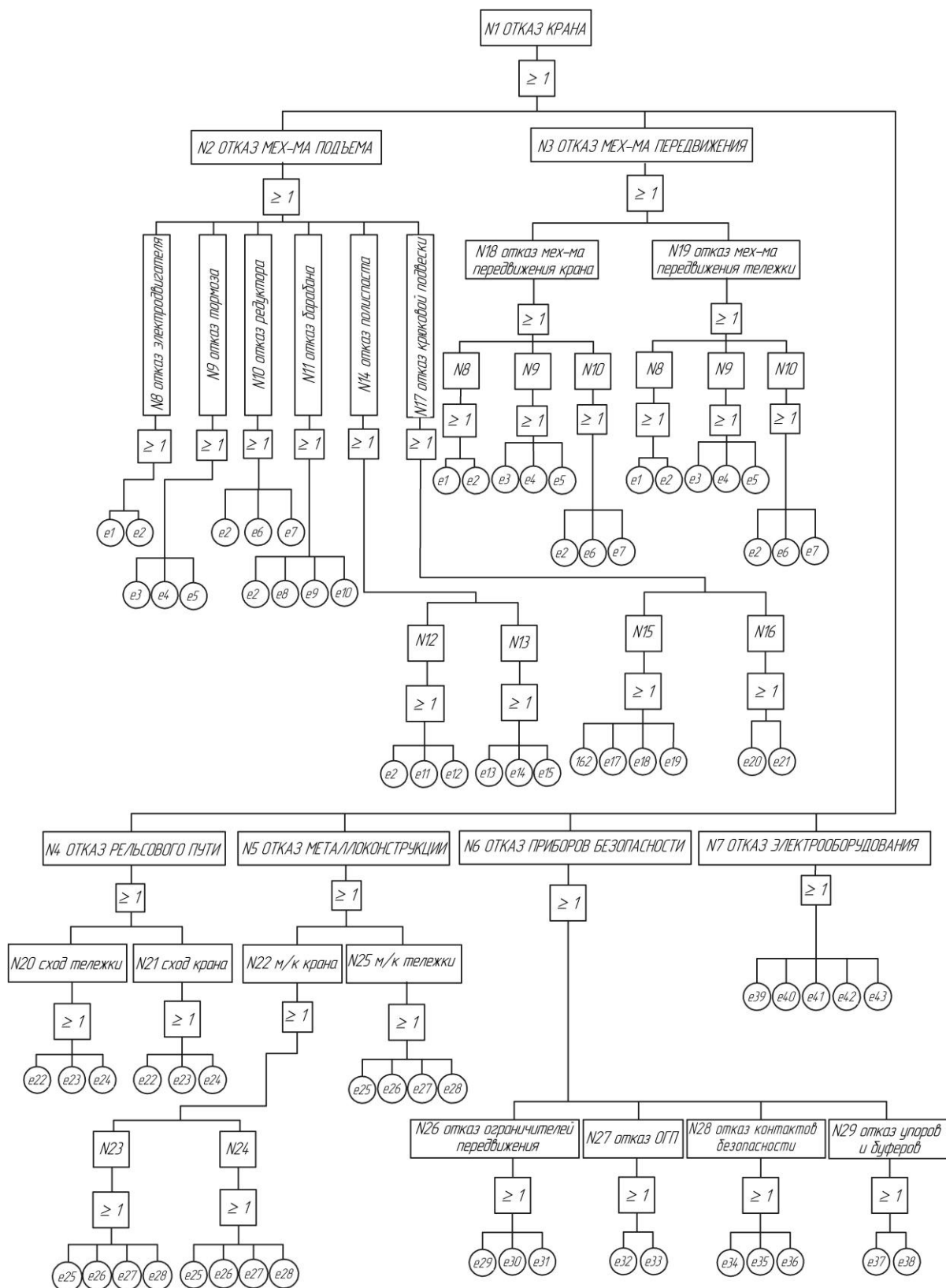


Рис. 1. Дерево отказов мостового крана

Условные обозначения элементов дерева отказов

Обозначение	Отказы и события
e1	Отказ катушки
e2	Отказ подшипника
e3	Трещина в ободе
e4	Трещина в колодках
e5	Отказ гидротолкателя или электромагнита
e6	Излом зубчатого колеса
e7	Отказ вала
e8	Отказ опоры
e9	Срыв резьбы в канатных зажимах
e10	Повреждение гребней канатных ручьев
e11	Трещины
e12	Деформация
e13	Обрыв сердечника
e14	Обрыв пряди
e15	Износ проволок
e16	Трещина в металлоконструкции
e17	Отказ стопорной гайки
e18	Отказ стопорной планки
e19	Отказ коромысла
e20	Разгиб крюка
e21	Трещина в сечении крюка
e22	Разрушение ходовых колес
e23	Излом рельс
e24	Излом роликов
e25	Трещины в сварных соединениях
e26	Изгиб
e27	Скручивание
e28	Трещины в металле
e29	Отказ ограничителя механизма подъема
e30	Отказ ограничителя механизма передвижения крана
e31	Отказ ограничителя механизма передвижения тележки
e32	Неисправность датчика
e33	Неисправность блока
e34	Отказ выключателя двери тамбура кабины
e35	Отказ аварийного выключателя питания крана
e36	Отказ выключателя питания крана при открытии люка
e37	Неисправность упругих элементов
e38	Отсутствие крепежных элементов
e39	Неисправность проводки
e40	Отказ кулачковых контроллеров
e41	Отказ магнитных пускателей
e42	Отказ магнитных контроллеров и реверсоров
e43	Отказ кабельного токопровода

После этого все результаты обрабатываются и находятся средняя (f_i) и относительная (Z_i) оценка значимости каждого отказа по формулам

$$f_i = \frac{\sum_{i=1}^L f_{i1}}{L}, \quad (1)$$

где f_i – оценка значимости i -го отказа 1-м специалистом-экспертом; L – число специалистов-экспертов; i – порядковый номер оценки отказа оценки;

$$Z_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_{i1} L}, \quad (2)$$

где n – число отказов.

На основании полученной относительной оценки значимости отказа мостового крана и статических данных по интенсивностям отказов определяется мера риска отказа конструктивного элемента крана:

$$\lambda_{\phi_i} = \lambda_i Z_i, \quad (3)$$

где λ_i – интенсивность отказа конструктивного элемента мостового крана по статическим данным; Z_i – относительная оценка значимости отказа конструктивного элемента мостового крана.

Результатом работы является количественная оценка безопасности эксплуатации мостовых кранов на основе логико-вероятностных методов, с использованием весовых коэффициентов, полученных экспертным путем, отражающих индивидуальные особенности по интенсивностям отказов конструктивных элементов и созданием на ее основе автоматизированной системы анализа риска эксплуатации мостовых кранов [5, 6].

Анализ существующих работ в области риска и безопасности показал, что целесообразно использовать в качестве распределения вероятности отказов мостовых кранов экспоненциальный закон [4]. Вероятность наступления неблагоприятного события (отказа) вычисляется по формуле

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda_{\phi_i} \cdot t}, \quad (4)$$

где λ_{ϕ_i} – интенсивность отказа i -го элемента крана с учетом экспертной оценки значимости; t – время.

Двигаясь снизу вверх по структуре дерева отказов, от исходных событий к главному – отказу мостового крана, вычисляется вероятность его наступления

$$Q_{N_1}(t) = 1 - (1 - Q_{N_2}(t)) \cdot (1 - Q_{N_3}(t)) \cdot \dots \cdot (1 - Q_{N_i}(t)), \quad (5)$$

где $Q_{N_i}(t)$ – вероятности наступления промежуточных событий.

Общий вид окна автоматизированной системы анализа риска эксплуатации мостовых кранов представлен на рис. 2.

N1 Отказ крана Q= 0.864535	N2 Отказ механизма подъема Q= 0.25027218		N8 Отказ мех-ма подъема Q= 0.215728486	e1 0.000036
			N9 Отказ тормоза Q= 0	e2 0.00045
				e3
				e4
				e5
		N10 Отказ редуктора Q= 0		e2
				e6
				e7
		N11 Отказ барабана Q= 0		e2
				e8
				e9
				e10
		N14 Отказ полиспаста Q= 0.04404558	N12 Отказ блоков Q= 0	e2
				e11
				e12
			N13 Обрыв каната Q= 0.04404558	e13 9.009E-05
				e14
				e15
		N17 Отказ крюковой подвески Q= 0	N15 Отказ траверсы Q= 0	e2
				e17
				e18
				e19
			N16 Отказ крюка Q= 0	e20
				e21
N3 Отказ мех-ма передвижения Q= 0.395890617	N18 Отказ мех-ма передвижения крана Q= 0.204671466		N8 Отказ мех-ма подъема Q= 0.204671466	e1 0.000458
				e2
			N9 Отказ тормоза Q= 0	e3
				e4
				e5
			N10 Отказ редуктора Q= 0	e2
				e6
				e7
		N19 Отказ мех-ма передвижения тележки Q= 0.240427877	N8 Отказ мех-ма подъема Q= 0	e1
				e2
			N9 Отказ тормоза Q= 0.240427877	e3
				e4
				e5 0.00055
			N10 Отказ редуктора Q= 0	e2
				e6
				e7
	N4 Отказ рельсового пути Q= 0		N20 Сход тележки Q= 0	e22
				e23
				e24
			N21 Сход крана Q= 0	e22
				e23
				e24
N5 Отказ металлоконструкции Q= 0.023226025	N22 Отказ металлоконструкции крана Q= 0.023226025		N23 Разрушение глпвных балок Q= 0	e25
				e26
				e27
				e28
			N24 Разрушение концевых балок Q= 0.023226025	e25
				e26 0.000047
				e27
				e28
			N25 Отказ металлоконструкции тележки Q= 0	e25
				e26
				e27
				e28
	N6 Отказ приборов безопасности Q= 0.698805788		N26 Отказ ограничителей передвижения Q= 0	e29
				e30
				e31
			N27 Отказ ОГП Q= 0	e32
				e33
			N28 Отказ контактов безопасности Q= 0.698805788	e34 0.0024
				e35
				e36
			N29 Отказ упоров и буферов Q= 0	e37
				e38
	N7 Отказ электрооборудования Q= 0.006975557			e39
				e40
				e41 0.000014
				e42
				e43

Рис. 2. Общий вид автоматизированной системы анализа риска мостового крана

Исходными данными являются интенсивности отказов конструктивных элементов и относительные оценки значимости, полученные с помощью экспертного метода. Система расчета реализована на базе табличного

редактора *Microsoft Excel*. Вычисления в ячейках производятся по формулам (4), (5). По данным системы мы можем оценивать величину риска отказа как всего крана, так и каждого его элемента в отдельности.

Библиографический список

1. Короткий, А.А. Применение индекса безопасности к грузоподъемным кранам / А.А. Короткий, А.С. Логвинов, С.С. Чичерин // Безопасность труда в промышленности. 1993. № 6. С. 50-52.
2. ГОСТ Р 51901.13-2005. Анализ дерева неисправностей. М.: Стандартинформ, 2005. 12 с.
3. ГОСТ Р 51901.12-2007. Метод анализа вида и последствий отказов. М.: Стандартинформ, 2007. 35 с.
4. Чичерин, С.С. Повышение безопасности мостовых кранов на основе анализа и оценки риска эксплуатации конструктивных элементов металлоконструкции: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2002. 24 с.
5. Анцев, В.Ю. Автоматизация расчета рисков возникновения отказов грузоподъемных кранов / В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, А.Д. Горынин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-1. С. 214-220.
6. Хохлов, Н.В. Управление риском: уч. пособие для вузов / Н.В. Хохлов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. 195 с.

УДК 621.87

В.Ю. Анцев, А.Н. Шафорост
Тульский государственный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУР ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКИХ СИСТЕМ МЕХАНОСБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Представлена методика оптимизации структуры транспортно-складских систем механосборочного производства по заданному критерию.

Ключевые слова: производственная система, механосборочное производство, многодольный граф, генетический алгоритм.

STRUCTURE OPTIMIZATION OF TRANSPORT AND STORAGE SYSTEMS OF MECHANICAL ASSEMBLY PRODUCTION

The technique of optimizing of the structure of transport and storage systems of mechanical assembly production according to predetermined criteria is presented.

Keywords: production system, mechanical assembly production, multipartite graph, genetic algorithm.

Современное машиностроительное производство организовано в форме совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих производственных систем. Производственная система может быть определена как совокупность взаимосвязанных и целенаправленно взаимодействующих элементов средств производства и труда, подобранных в соответствии с заданными критериями совместимости, целесообразности, экономичности

и адаптированных для определенной производственной деятельности (выпуска продукции или оказания услуг).

Производственную систему любого уровня схематично можно представить следующим образом (рис. 1) [1].

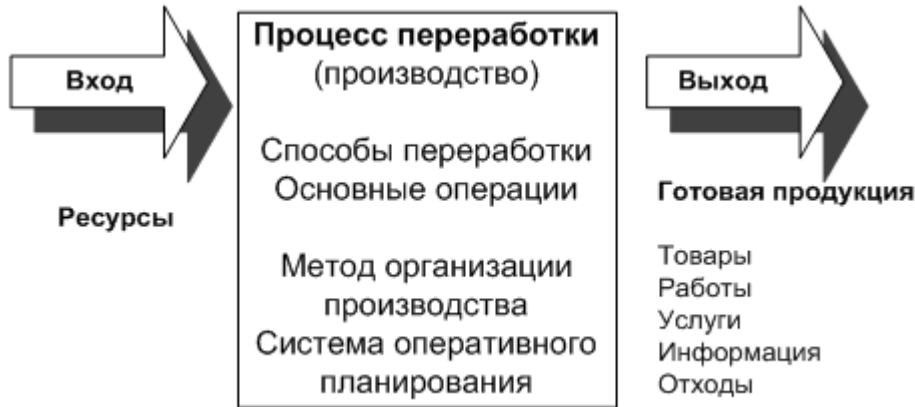


Рис. 1. Характеристика производственного процесса

Задача предприятия, цеха или участка состоит в том, чтобы воспринять «на входе» факторы производства (ресурсы), переработать их и «на выходе» выдать готовую продукцию (результат).

Производственный участок представляет собой достаточно сложную систему, структура и деятельность которой непосредственно зависят от сложности и разнообразия выпускаемой продукции, характера технологического процесса ее изготовления и объема производства. При этом участок представляет собой одновременно подсистему цеха как систему более высокого порядка.

Механосборочное производство представляет собой комплекс производственных участков и вспомогательных подразделений, в котором протекают производственные процессы изготовления изделий.

Основными этапами производственного процесса являются получение и складирование заготовок, доставка их к рабочим местам, различные виды обработки, перемещение полуфабрикатов между рабочими местами, контроль качества, хранение на складах, сборка изделий. Причем функционирование производственного процесса невозможно без транспортно-складской системы (ТСС), являющейся основным организующим и связующим звеном производственного процесса.

Для сокращения транспортных операций по основному и дополнительному перемещению грузов необходимо формировать транспортно-складскую систему из транспортных средств, наиболее полно соответствующих производственному процессу предприятия.

В тоже время парк транспортных и погрузочно-разгрузочных средств огромен и функционален. Каждое транспортное средство, погрузо-разгрузочная машина и механизм занимают свое определенное место в технологическом процессе.

Для создания обобщенной структуры ТСС, позволяющей осуществить анализ максимального числа их возможных альтернативных вариантов и выбрать среди них оптимальный, нами предлагается использование метода многодольных графов, позволяющего рассмотреть и сравнить максимальное количество подъемно-транспортных средств, образующих транспортную систему [2].

Многодольный граф – это граф вида $G=(X_1, X_2, \dots, X_n, R)$, где $X = UX_i$ – множество вершин, а R – множество ребер. Подмножество X_i – доли графа, ребра графа могут соединять только вершины разных долей. Вершины, принадлежащие одной доле, всегда являются независимым подмножеством.

Аппарат многодольных графов дает ясный способ описания обобщенных структур. С его помощью получается четкое описание решения задачи синтеза транспортно-складской системы. В этом случае любой полный N -вершинный подграф многодольного графа является решением задачи.

При описании обобщенных структур систем и процессов элементы N -дольных графов получают толкование:

- доли представляют основные технические подфункции класса;
- вершины каждой доли соответствуют техническим реализациям.

Аппарат многодольных графов не только дает ясный способ описания обобщенных структур с простой функциональной структурой, с его помощью можно дать четкое описание решения задачи структурного синтеза, учитывающего бинарные запреты на сочетания. Любой полный N -вершинный подграф многодольного графа является решением поставленной задачи.

Решающий граф должен быть полным, поскольку он не может содержать запрещенные пары вершин. Чтобы технический объект отвечал своему назначению, он обязан выполнять все основные технические подфункции, которые представлены долями графа. Выбор любой вершины из доли обеспечивает реализацию соответствующей технической подфункции. Это значит, что количество вершин в решающем графе должно совпадать с числом долей, которое равно N .

Для синтеза структуры ТСС методом многодольных графов были проанализированы возможные варианты проектирования транспортной системы цехов и предложена классификация, образующая структуру транспортно-складских систем [3, 4]:

1. По назначению транспортной системы.
 - 1.1. Внутрицеховые. 1.2. Межоперационные.
2. По принципу движения.
 - 2.1. Периодические. 2.2. Непрерывные.
3. По направлению движения.
 - 3.1. Однонаправленные. 3.2. Разнонаправленные.
4. По уровню расположения рабочей ветви.
 - 4.1. Напольные. 4.2. Эстакадные. 4.3. Подвесные.

5. По принципу работы.

5.1. Несущие. 5.2. Толкающие. 5.3. Тянущие.

6. По конструктивному исполнению.

6.1. Рельсовые. 6.2. Безрельсовые.

7. По типам средств транспортирования ($7.i$, где $i = 1, 2, \dots, 17$ соответствует: краны-штабелеры, краны мостовые, рельсовые тележки, шаговые конвейеры, пластинчатые конвейеры, ленточные конвейеры, роликовые конвейеры, цепные конвейеры, подвесные грузонесущие конвейеры, подвесные толкающие конвейеры, монорельсовый транспорт, транспортно-перегрузочные роботы, индуктивные тележки, самоходные тележки с инерционным управлением, подвесные роботы, подъемники, электропогрузчики).

8. По способу загрузки технологического оборудования.

8.1. Ручной. 8.2. Механизированный. 8.3. Автоматический.

9. По типу оборудования для загрузки рабочих позиций.

9.1. Манипуляторы. 9.2. Роботы. 9.3. Устройства смены спутников. 9.4. Загрузка осуществляется транспортным средством.

10. По типу устройств для обслуживания склада.

10.1. Краны-штабелеры. 10.2. Мостовые краны. 10.3. Напольные роботы.

11. По способу хранения грузов.

11.1. В стеллажном складе с напольным краном-штабелером. 11.2. В стеллажном складе с подвесным краном-штабелером. 11.3. В складе элеваторного типа. 11.4. В пристаночном накопителе. 11.5. На конвейере. 11.6. В подвесном складе кассетного типа.

12. По способу транспортирования заготовок.

12.1. В поддоне. 12.2. На спутнике. 12.3. В кассете. 12.4. На паллетах.

Элемент функциональной структуры транспортно-складской системы представлен на рис. 2.



Рис. 2. Функциональная структура транспортно-складской системы

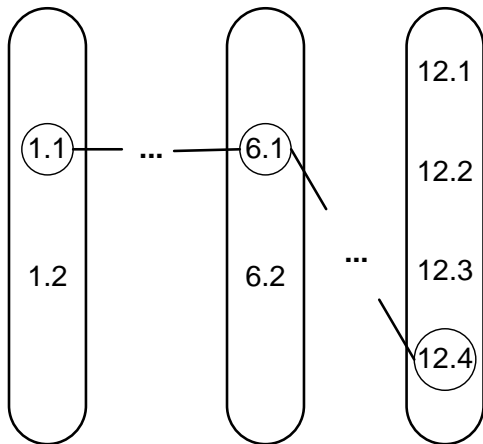


Рис. 3. Представление обобщенной структуры транспортно-складской системы в виде многодольного графа

В свою очередь многодольный граф, построенный по заданной функциональной структуре транспортно-складской системы, представлен на рис. 3.

Для решения задач, связанных с оценкой вариантов ТСС, полученных в результате синтеза транспортной системы, а также оценивания подсистем, образующих конечный вариант, предлагается использование генетического алгоритма (рис. 4) [5].

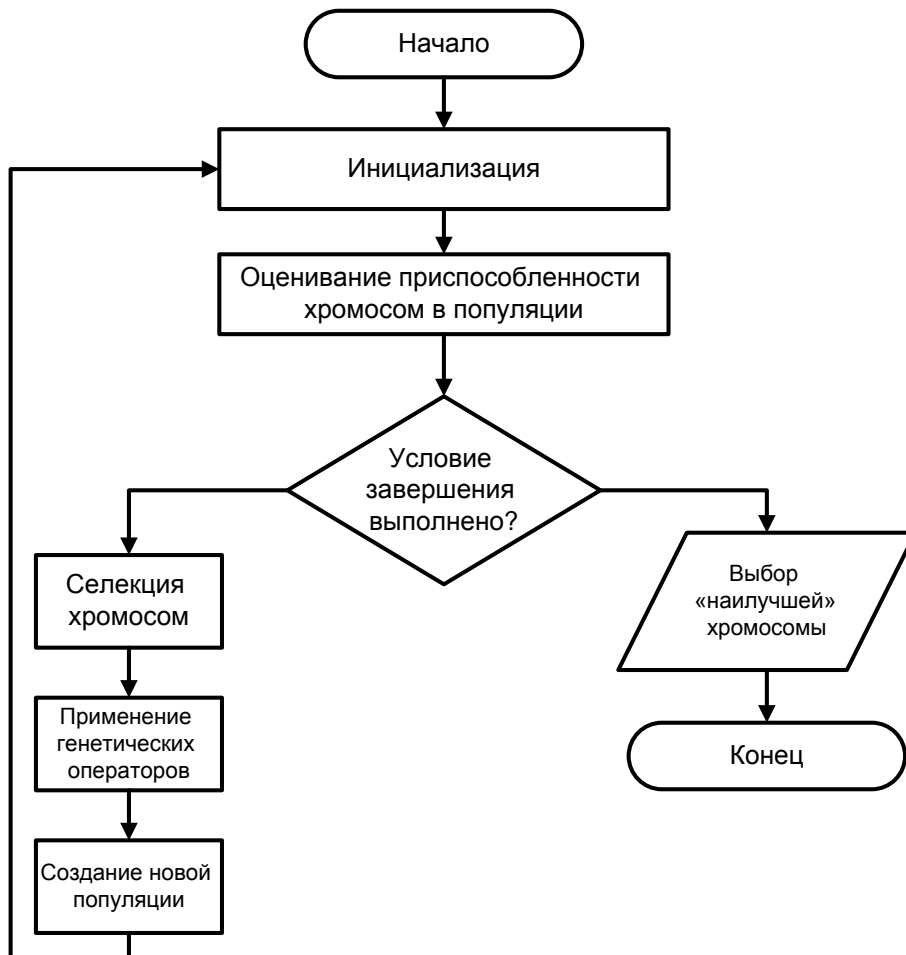


Рис. 4. Блок-схема генетического алгоритма

Генетический алгоритм представляет собой метод, отражающий естественную эволюцию задач оптимизации [5].

Основной генетический алгоритм состоит из шагов:

- инициализация, или выбор исходной популяции хромосом, – выбор сгенерированной структуры ТСС;

- оценка приспособленности хромосом в популяции – оценивание совместимости подсистем, образующих данный вариант ТСС;
- проверка условия останова алгоритма;
- селекция хромосом – синтез очередного варианта ТСС;
- применение генетических операторов – изменение предыдущего сгенерированного варианта ТСС путем замены одной из вершин графа;
- формирование новой популяции – формирование нового варианта ТСС;
- выбор «наилучшей» – выбор оптимального варианта транспортно-складской системы.

Представленный подход к созданию оптимальной структуры транспортно-складских систем позволяет осуществить анализ максимального числа их возможных альтернативных вариантов и выбрать среди них оптимальный по необходимому критерию.

Библиографический список

1. Жолобов, А.А. Экономика и организация машиностроительного производства. Дипломное проектирование: уч. пособие / А.А. Жолобов, А.Г. Барановский, В.Т. Высоцкий. Минск: Изд-во Гревцова, 2011. 328 с.
2. Белоусов, А.И. Дискретная математика: учеб. для вузов / А.И. Белоусов, С.Б. Ткачев. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 744 с.
3. Анцев, В.Ю. Оптимизация структуры внутрицехового транспорта машиностроительных предприятий / В.Ю. Анцев, А.Н. Шафорост // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. № 2-4. С. 104-109.
4. Анцев, В.Ю. Оптимизация металлических конструкций грузоподъемных машин мостового типа / В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, П.Ю. Калабин // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. Вып. 4. С. 18-22.
5. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 452 с.

УДК 621.311

С.Д. Семеев, В.В. Шелгунов
Тверской государственной технической университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЛЬПЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТ ОТЛОЖЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ СИСТЕМ ГИДРОЗОЛОУДАЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Рассмотрены проблемы работоспособности и надежности трубопроводов оборотных систем гидрозолоудаления тепловых электростанций. Рассмотрены причины образования минеральных отложений и абразивного износа в трубопроводах. Приведены сведения о расчете и значениях скорости роста отложений и их износа. Предложен способ механической очистки трубопроводов от отложений пульпой.

Ключевые слова: система гидрозолоудаления, трубопроводы, минеральные отложения, пульпа, износ, механическая очистка.

PULP USAGE FOR DECONTAMINATION OF PIPELINES OF HYDRAULIC DEASHING SYSTEMS OF HEAT POWER STATIONS

The present article is concerned with the problems of efficiency and reliability of the pipelines of hydraulic deashing systems of heat power stations. This paper summarizes some reasons of the formation of mineral deposits and abrasive wear of pipelines. The information about calculating and values of the growth-rate of deposits and its wear is detailed in article. The method of mechanical cleaning of pipelines from deposits by pulp is proposed.

Keywords: hydraulic deashing systems, pipelines, mineral deposits, pulp, wear, mechanical cleaning.

Значительная доля общего объема вырабатываемой энергии (более 75% электрической и свыше 80% тепловой) приходится на тепловые электрические станции (ТЭС), большинство из которых работает на твердом топливе. Рост мощностей ТЭС и тенденция к преимущественному использованию в теплоэнергетике дешевых высокозольных видов топлива обуславливают увеличение количества золошлаковых отходов. Экологически безопасное удаление и складирование золы и шлака является одной из наиболее трудоемких операций в процессе производства энергии на ТЭС, сжигающих твердое топливо. Поэтому проблемы золошлакоудаления весьма актуальны для отечественной энергетики.

В России для золошлаковых отходов ТЭС, как правило, применяется гидротранспорт на золоотвалы. Широкое распространение гидрозолоудаления (ГЗУ) объясняется его экономичностью, простотой аппаратного оформления, а также возможностью автоматизации и механизации всех основных операций этого процесса. Вместе с тем системы ГЗУ требуют больших затрат технической воды и обеспечения ее очистки при сбросе в природные водоемы, рекультивации золошлакоотвалов, ограничивают область использования золы и шлака. Поэтому, несмотря на то, что проекты новых ТЭС все чаще предусматривают сухие либо комбинированные системы золоудаления, гидравлический способ удаления отходов сжигания твердого топлива остается доминирующим.

Массовое освоение гидротранспорта золошлаков началось в отечественной энергетике с конца 40-х годов. Первые системы ГЗУ работали по прямоточной схеме: золошлаковая пульпа перекачивалась на золоотвал, а использованная вода сбрасывалась в ближайший природный водоем. С целью экономии технической воды и защиты окружающей среды в течение последних четырех десятилетий все ТЭС строятся только с оборотными системами ГЗУ, а на большинстве действующих произведена соответствующая реконструкция. Применение оборотных систем ГЗУ существенно улучшает экологическую обстановку. При работе систем в бессточном режиме полностью ликвидируется ущерб окружающей среде, причиняемый сбросами использованной воды. Однако, несмотря на очевидные преимущества, перевод систем ГЗУ на оборотный цикл осложнен рядом затруднений, связанных главным образом с зарастанием оборудования

(насосов, трубопроводов, сопел, мокрых золоуловителей) минеральными отложениями. Указанное явление приводит к повышению гидравлического сопротивления трубопроводов, снижению производительности насосов, а следовательно, к дисбалансу системы и нарушению бессточного режима ее работы. В настоящее время по этой причине большинство действующих оборотных систем ГЗУ работают со сбросами от 20 до 80% осветленной воды. В условиях образования отложений возрастают эксплуатационные расходы, связанные с мероприятиями, обеспечивающими нормальную работу ГЗУ (предотвращение отложений, очистка оборудования).

Наиболее распространены отложения, состоящие из карбоната кальция. Они образуются в оборудовании и коммуникации систем ГЗУ, оборотная вода которых имеет щелочную реакцию ($pH > 10,5$). Линейная скорость роста карбонатных отложений в тракте возврата осветленной воды уменьшается по направлению от золоотвала к электростанции и обычно не превышает 20...40 мм в год.

Но поздней осенью и ранней весной в течение 2...4 недель, а при определенных условиях и во время всего промежутка между указанными периодами года интенсивность зарастания элементов ГЗУ увеличивается в десятки и даже сотни раз. Резкое возрастание скорости роста отложений связано с образованием кристаллической модификации карбоната кальция, а именно его шестиводного кристаллогидрата (гексагидрата карбоната кальция) – $CaCO_3 \cdot 6H_2O$. Образование гексагидратных отложений в первую очередь отражается на работе насосов осветленной воды. Зарастанию отложениями $CaCO_3 \cdot 6H_2O$ также подвержены и магистральные трубопроводы осветленной воды, коммуникации и оборудование внутренней системы гидрозолоудаления.

Интенсивность образования отложений главным образом определяется пересыщением осветленной воды карбоната кальция и скоростью ее движения. В результате обработки опытных данных получена зависимость скорости роста минеральных отложений от указанных выше факторов [1]:

$$V_{от} = 8,22(1 + w)^{-1,87} \cdot \Delta C^{(3,47 - 0,09w)},$$

где $V_{от}$ – линейная скорость роста гексагидратных отложений, мм/сутки; w – скорость движения воды, м/с; ΔC – абсолютное пересыщение воды карбонатом кальция, мг-экв/л.

Для обеспечения нормального функционирования оборотных систем ГЗУ в условиях образования отложений проводятся специальные мероприятия. Они сводятся, во-первых, к устранению причин пересыщения пульпы и осветленной воды, во-вторых, к стабилизации химического состава воды на безопасном, с точки зрения возникновения отложений, уровне и, в-третьих, к применению различных способов очистки. Применение тех или иных мероприятий определяется видом отложений, спецификой образования, а также экономическими затратами.

Механические методы основаны на разрушении отложений путем вибрации, скалывания, истирания или путем ударного воздействия на стенки заросшего оборудования. Сюда же следует отнести все виды ручной очистки, которые сейчас применяется в основном для удаления отложений из насосов, сопл, гидрозатворов, труб-коагуляторов Вентури мокрых золоуловителей.

При очистке водой высокого давления разрушение отложений происходит за счет динамического давления струи вытекающей из гидромониторного аппарата.

Термическая очистка заключается в предварительном прогреве трубопровода паром с последующим резким охлаждением их пульпой или водой. Разность температурных коэффициентов расширения материала трубопровода и отложений определяет различную величину тепловых деформаций. В результате возникающих механических напряжений происходит разрушение отложений. Способ применим, если толщина отложений не превышает 20...25 мм. При более толстом слое наблюдается плохой прогрев и, кроме того, появляется вероятность образования пробок из разрушенных отложений. Перечисленные недостатки, а также необходимость большого расхода пара, установка дополнительных компенсаторов, небольшая протяженность очищаемой трассы (не более 600 м) ограничивают применение этого способа. Обычно этот способ используют только для очистки секций трубопроводов, смывных насосов и побудительных сопл внутренней системы ГЗУ электростанции.

Химическая очистка состоит в растворении карбонатных и гидратных отложений кислотой. Для очистки требуется сооружение хранилищ, насосной с оборудованием для перекачки кислоты, растворного узла, устройств для дозировки и контроля за промывкой во избежание коррозии. Главным недостатком этого способа является большой расход кислоты.

Рассмотренными методами можно очищать от отложений только отключенные оборудование и коммуникации. Поэтому в системах ГЗУ, где невозможно предотвратить образование отложений, необходимо резервирование оборудования и коммуникаций.

Таким образом, разработка комплекса мероприятий по предотвращению и удалению отложений с учетом особенностей их образования является необходимым условием для решения задачи обеспечения нормальной работоспособности оборотных систем ГЗУ.

Кроме образования отложений при эксплуатации систем ГЗУ возникает проблема, влияющая на их работоспособность и надежность, – абразивный износ материала трубопроводов гидротранспорта золошлаковых отходов (пульпопроводов) смесью воды, золы и шлака (пульпой). Абразивный износ является сложным физико-механическим процессом, скорость которого зависит от множества факторов. В частности на величину износа влияют физические и химические свойства частиц золы и шлака;

размеры и форма абразивных частиц; концентрация последних в пульпе; свойства материала пульпопровода; скорость движения пульпы, а также другие факторы.

Наиболее приемлемой для расчета износа трубопроводов систем ГЗУ пульпой является методика, предложенная Всесоюзным проектным и научно-исследовательским институтом промышленного транспорта [2].

В соответствии с данным документом можно вывести формулу для расчета скорости износа стенки пульпопровода:

$$W = A_3 \cdot K_n \cdot D^{1,7} \cdot r_n^{0,25} / (\pi \cdot r_n \cdot D \cdot L \cdot K_r \cdot K_b \cdot v \cdot \tau),$$

где A_3 – коэффициент абразивности эталонного материала; K_n – коэффициент износостойкости материала пульпопровода; D – внутренний диаметр пульпопровода, м; r_n – плотность пульпы, кг/м³; L – длина пульпопровода, м; K_r – коэффициент относительной гидроабразивности; K_b – коэффициент наклона труб, учитывающий износ стенок, в зависимости от угла наклона пульпопровода; v – скорость движения пульпы, м/с; τ – продолжительность работы пульпопровода, год.

В настоящей работе предлагается механический способ очистки трубопроводов систем ГЗУ от минеральных отложений, основанный на использовании их абразивного износа пульпой тепловых электростанций. Суть способа заключается в организации периодического изменения потоков пульпы и осветленной воды. При критическом уменьшении (30% от номинального) из-за зарастания отложениями площади поперечного сечения трубопроводов осветленной воды в них подается пульпа для транспортирования ее на золоотвал. Абразивные свойства частиц золы и шлака при движении пульпы обеспечивают истирание отложений и последующее удаление продуктов износа. Неравномерность износа по длине и диаметру трубопроводов способствует образованию трещин на инкрустированной поверхности, а также раскалыванию отложений за счет гидродинамического воздействия потока пульпы. В тоже время осветленная вода через пульпопроводы подается с золоотвала на станцию. Образовавшиеся за время такого режима движения потоков отложения в пульпопроводах можно рассматривать как защитное покрытие материала трубопровода, обеспечивающее уменьшение износа и увеличения срока службы коммуникаций.

Техническое решение для реализации предлагаемого способа очистки трубопроводов систем ГЗУ ТЭС от минеральных отложений заключается в установке после соответствующих насосов перемычек между пульпопроводами и трубопроводами осветленной воды и необходимой по нормам [3] арматуры. Также следует отметить, что при указанной выше замене коммуникаций для потоков пульпы и осветленной воды не произойдет существенного изменения их гидравлического режима, так как трубопроводы и пульпопроводы изготавливаются одинакового или близкого по величине диаметра.

Таким образом, предлагаемый простой по техническому исполнению механический способ очистки трубопроводов за счет уменьшения износа и удаления минеральных отложений позволит обеспечить нормальную работоспособность, а также повысить надежность функционирования оборотных систем гидрозолоудаления тепловых электростанций.

Библиографический список

1. Семейков, С.Д. Отложения гексагидрата карбоната кальция в оборудовании оборотных систем гидрозолоудаления / С.Д. Семейков, В.В. Шелгунов // Тез. докл. междуна. науч. конф. «Кинетика и механизм кристаллизации». Иваново: Изд-во ИвХТУ, 2000. С. 128.
2. Орешкин, Л.П. Пособие по проектированию гидравлического транспорта (к СН и П 2.05.07 – 85) / Л.П. Орешкин, Ю.Ш. Слепой, М.Д. Колбенева М.: Стройиздат, 1988. 72 с.
3. РД 34.27.103 – 81. Чеканов Г.С. Методические указания по выбору трубопроводов и оборудования для бессточных систем золошлакоудаления тепловых электростанций / Г.С. Чеканов, Е.В. Соцкова, Н.Н. Будникова / М.: ЦНТИ Союзтехэнерго, 1983. 16 с.

УДК 622.331.002.5

И.В. Горлов, С.П. Рыков
Тверской государственной технической университет

ПОСЛЕДСТВИЯ ОТКАЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ДОБЫЧЕ ТОРФА

В статье рассмотрена методика определения последствий отказа торфяных машин в зависимости от выполняемой операции, количества однотипных технологических единиц, участвующих в технологическом процессе добычи, и влияния неблагоприятных климатических факторов

Ключевые слова: добыча торфа, отказ, техническое состояние, потери, информационные модели

THE CONSEQUENCES OF TECHNOLOGICAL MACHINES FOR MILLING PEAT EXTRACTION FAILURE

In the article the method of determining the consequences of failure of peat machines in dependence on the performed operation, the number of similar technological units involved in the technological process and the influence of adverse climatic factors is considered.

Keywords: peat extraction, failure, technical condition, losses, information models

Фрезерный способ добычи торфа по сравнению с другими имеет наименьшую трудоемкость, что обеспечивает относительно невысокую себестоимость продукции. Торфяные месторождения для добычи фрезерным способом предварительно осушают и подготавливают эксплуатационные площади, которые планируют по определенным схемам.

Производственный участок добычи торфа чаще всего формируется из четырех карт размером 40×500 метров или восьми карт размером 20×500 метров.

Фрезерный способ добычи торфа включает 3 стадии: фрезерование верхнего слоя торфяной залежи на глубину 5–20 мм для получения торфяной крошки, сушка отфрезерованного слоя крошки на поверхности торфяной залежи до установленной влажности и уборка торфа в полевые складочные штабели.

Выполнение всех необходимых операций при фрезерной добыче торфа обеспечивается работой технологического оборудования комплексами по заранее выработанным схемам в соответствии с цикловыми графиками. Выбор конкретной технологической схемы зависит от использования добытого торфа и применяемой уборочной техники.

При фрезерной добыче торфа технологические машины объединяются в комплексы, с помощью которых реализуются различные схемы уборки. Внутри комплекса торфяные машины связаны друг с другом в одну технологическую цепочку, нарушение которой приводит к существенному снижению добычи торфа, а отказ какой-либо машины в начале цепочки, может даже остановить процесс добычи.

Время выполнения какой-либо i -ой операции по добыче торфа можно определить исходя из объема выполняемых работ, производительности и количества технологических машин:

$$t_i = \frac{Q}{n \times q},$$

где Q – объем выполняемых работ на операции; q – производительность технологической машины; n – количество технологических машин участвующих в технологической операции.

При отказе технологической машины необходимо учитывать потери рабочего времени на восстановление работоспособности, так как технологический цикл имеет строгие границы, за пределы которых выходить не рекомендуется вследствие нарушения процесса добычи торфа.

При использовании одной из технологических схем добыча торфа может производиться пневмоуборочными комбайнами, которые одновременно с уборкой производят фрезерование торфяной залежи. Активная сушка торфяной фрезерной крошки происходит, начиная с 9 часов утра до 17 часов, а уборка должна производиться не позднее 19–20 часов вечера, так как позже из-за повышенной влажности качество добываемого торфа существенно ухудшается. Поэтому при благоприятных погодных условиях с 9 часов утра в течение 3–4 часов происходит сушка предварительно отфрезерованного слоя, затем производится ворошение в интервале времени 12–13 часов дня, а после второй сушки производится уборка высушенного торфа пневмоуборочными комбайнами из расстила в районе 16–19 часов вечера.

При отказе какой-либо технологической машины требуется время на устранение неисправности, в результате чего происходит смещение последующих технологических операций на более позднее время. Если в результате смещения уборка производится до времени наступления неблагоприятных условий, то потери от простоя можно считать незначительными. Если уборка не может быть завершена до наступления неблагоприятных условий, то неубранный остаток переносится на следующий день и включается в следующий уборочный цикл, что приводит к дополнительным затратам, величина которых определяется индивидуально.

Ущерб от простоя машины при отказе должен определяться с учетом влияния на весь технологический процесс добычи торфа в целом.

Дополнительное время, которое потребуется на реализацию принятого циклового сбора торфа, можно рассчитать исходя из уменьшения суммарной производительности группы машин, участвующих в конкретной операции из-за отказа одной из них:

$$\Delta t_i = \frac{Q}{(n-1) \times q} - \frac{Q}{n \times q}.$$

Преобразовав это выражение, получим:

$$\Delta t_i = \frac{Q}{n \times q} \frac{1}{n-1}.$$

Обозначив выражение $\frac{1}{n-1} = J$ (коэффициент значимости), формулу можно представить как

$$\Delta t_i = \frac{Q}{n \times q} J.$$

Значение коэффициента значимости J обычно обратно пропорционально количеству машин данного типа, участвующих в техпроцессе. По результатам расчетов при $J > 0,5$ обычно приходится часть работ переносить на следующий цикл добычи, т.е. возникают значимые потери. Если $J \leq 0,5$, то потери можно считать несущественными.

Представленные результаты расчетов справедливы в том случае, если в течение цикла добычи не возникают внеплановые изменения климатических факторов. Поэтому в реальных условиях добычи смещения в технологическом процессе не всегда допустимы.

Для раскрытия сущности взаимодействия процессов добычи торфа во времени допустим, что на производственном участке при двухдневном цикле необходимо добыть 320 тонн торфа. Производственный участок эксплуатируется четвертый год, расположен на низинном типе залежи со средней степенью разложения 28%, пнистостью 0,9%, условной влажностью добытого торфа 55%.

Добыча торфа может осуществляться по нескольким технологическим маршрутам. Необходимое количество технологических машин для реализации процесса добычи определяется исходя из их производительности (таблица).

Производительность торфяных машин по добыче фрезерного торфа

Машина	Марка	Тягач	Ширина захвата, м	Скорость, км/ч	Ширина карты, м	Производительность Q , га/ч	Обозначение машины в технологическом маршруте
Фрезерные барабаны	МТФ-14	ДТ-75Б	9,5	7,1	40	4,06	a_1
					20	4,26	a_2
	МТФ-17	ДТ-75Б	9,5	8,37	40	4,79	a_3
					20	5,03	a_4
Ворошилки	МТФ-21	ДТ-75Б	9,6	10,85	40	7,88	b_1
					20	7,53	b_2
	МТФ-22	ДТ-75Б	19,2	10,85	40	15,43	b_3
					20	14,75	b_4
	ВФ-18СЗ	ДТ-75Б	19,2 18,3	10,85	40	14,93	b_5
					20	14,11	b_6
	Т-150К	Т-150К	19,2 18,3	20,36	40	28,01	b_7
					20	26,48	b_8
	ВФС-1	МТЗ-82	9,6 9,0	18,0 18,0	40	13,29	b_9
					20	12,46	b_{10}
Валкователь	МТФ-33Б	ДТ-75Б	19,0	9,31	40	11,84	c_1
			18,0		20	11,09	c_2
Фрезер-валкователь	МТФ-96	ДТ-75Б	5,0	6,08	–	1,79	c_3
		Т-4А	5,0	8,53	–	2,5	c_4
		ДТ-175Т	5,0	10,5	–	3,08	c_5
Бункерная машина	МТФ-43А	ДТ-75Б	3,2–4,75	7,3	40	1,5–2,0	d_1
			3,0–4,75		20	1,5–2,0	d_2
Прицепная пневмоуборочная машина	ППФ-3	ДТ-75	2,4	8,67	40	1,22	d_3
					20	1,24	d_4
	ППФ-5	ДТ-75	3,0	7,8	40	1,37	d_5
					20	1,39	d_6
Пневмоуборочный комбайн	БПФ-3М	–	4,8	4,6-6,35	40	1,3–1,8	e
					20	1,24–1,7	

Для первой технологической схемы маршрут добычи на производственном участке площадью 16 га с картами 40×500 метров может реализовываться с помощью нескольких машин, например, четырех фрезерных барабанов МТФ-14 ($4a_1$ – в соответствии с обозначением в таблице), одной ворошилки МТФ-22 (b_3), одного валкователя МТФ-33Б (c_1), восьми бун-

керных уборочных машин МТФ-43А (8d₁). В этом случае технологический маршрут G₁ добычи торфа можно представить в виде

$$G_1 - (4a_1), (b_3), (c_1), (8d_1).$$

Аналогично можно представить другие возможные маршруты добычи торфа с использованием разных технологических схем и машин и отразить их в виде матрицы:

$$G_n - \begin{cases} 4a_1, b_3, c_1, 8d_1; \\ 3a_3, b_5, c_1, 4d_1; \\ b_1, 4c_3; \\ 2a_1, b_1, 4d_6; \\ b_1, 4e; \\ \dots \end{cases}$$

Установив значение циклового сбора и стоимость добытого торфа, можно рассчитать ущерб от отказа какой-либо машины, участвующей в технологическом процессе.

Особенно тяжелые последствия отказа для машин, которые функционируют в начале технологического маршрута и представлены одной единицей, например, ворошилка МТФ-21 или валкователь МТФ-33Б. При отказе этих машин технологический процесс останавливается полностью вплоть до устранения отказа. При отказе машин, которые функционируют в конце технологического процесса, потери могут быть менее значительные, особенно если таких машин участвует в техпроцессе несколько.

Так, например, для уборки фрезерного торфа из расстила с шестнадцати гектаров четырьмя пневмоуборочными комбайнами БПФ-3М требуется приблизительно 2,6 часа. При отказе одного из комбайнов остальным для уборки восьми гектаров потребовалось бы 3,4 часа, т.е. потери бы составили 0,8 часа.

В том случае, если в течение цикла добычи не возникнет неплановых изменений погоды, приводящих к возникновению неблагоприятных условий для добычи, значимых потерь из-за отказа одного комбайна не возникнет ($J = 1/3$). Если в конце цикла добычи возникнут неблагоприятные погодные условия (в 18.30 пойдет интенсивный дождь), то потери из-за отказа комбайна могут привести к существенным последствиям.

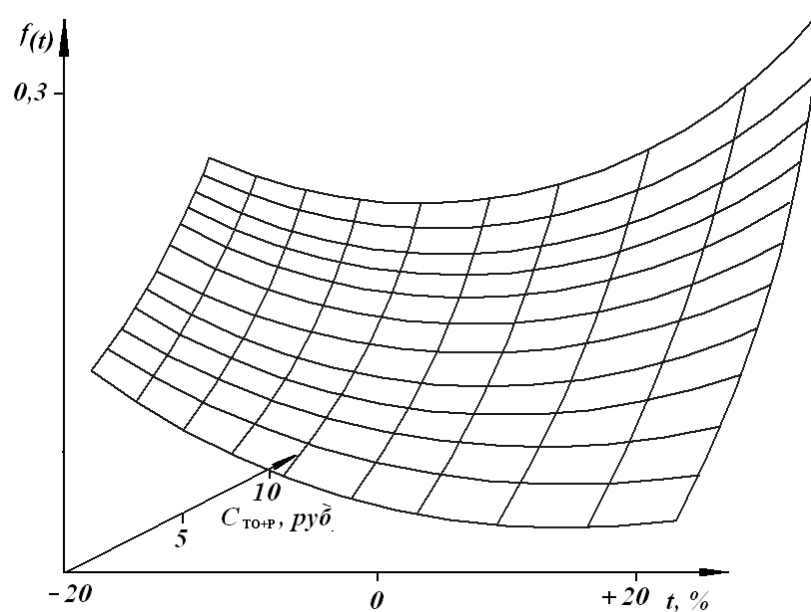
При средней производительности комбайна потери от простоя могут составить около 12 кубометров торфа, что с учетом затрат на дополнительное ворошение, подготовку и ремонт производственных площадей, а также хранение и транспортирование составит около 8 тысяч рублей.

Предотвращение отказов – это одна из основных задач, которые могут решаться с помощью диагностики и анализа состояния диагностируемого объекта. Одним из актуальных направлений повышения эффективности использования торфяных машин является создание автоматизирован-

ной системы управления состоянием технологических элементов в зависимости от конкретных условий эксплуатации на основе анализа модели технического объекта.

Модель технологической машины представляет собой информационную систему, состоящую из модулей, имеющих определенное назначение с точки зрения учета какого-либо фактора воздействия, влияющего на эксплуатацию МДТ (машин для добычи торфа). После ввода внешних данных задаются условия расчета: с учетом совпадения дней ТО и ремонтов с метеонеблагоприятными днями, без их учета или с учетом смещения наработки до ТО и ремонта. Просчитав на модели все возможные варианты состояния технологического объекта можно с высокой долей вероятности принять правильное решение об условиях эксплуатации реальной машины.

С помощью разработанной модели технического состояния были проведены расчеты параметров эксплуатации при различных условиях (рисунок). Так при смещении обслуживания сопряжений в меньшую сторону на 15–20% эксплуатация была эффективной для деталей стоимостью с проведением ремонта до 5 тысяч рублей, на 5–10% – для деталей стоимостью до 10 тысяч рублей.



Изменение функции состояния технологической машины при смещении ТО и ремонтов

При увеличении периода обслуживания на 5–10% возрастает вероятность отказа, если прогнозировался отказ первой категории, то он существенно не влиял на эффективность эксплуатации.

Если прогнозировался отказ второй категории, то для недорогих деталей с небольшой трудоемкостью ремонта эффективность эксплуатации не снижалась, а для дорогих деталей с большой трудоемкостью

ремонта снижалась существенно. Отказы третьей категории для крупных торфяных машин недопустимы.

Исследование на модели показало, что эффективность эксплуатации может существенно изменяться от конкретных условий, потому решения о воздействии на машину должно приниматься индивидуально для каждой конкретной ситуации.

Библиографический список

1. Горлов, И.В. Инновационные технологии восстановления работоспособности машин торфяного комплекса: монография / И.В. Горлов, А.Н. Болотов. Тверь: Издатель Кондратьев А.Н., 2012. 170 с.

2. Горлов, И.В. Оптимизация задачи управления ресурсом при эксплуатации машин для добычи и переработки торфа / И.В. Горлов, А.Н. Болотов, А.И. Горлов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2012. Вып. 5. С. 76-79.

3. Калачин, С.В. Прогнозирование эксплуатационных параметров МТА с учетом его технического состояния // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2008. № 7. С. 30-31.

УДК 621.941.1

М.Ш. Мигранов

Уфимский государственный авиационный технический университет

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТОЧЕНИИ

Рассматривается проблема управления движением приводов главного движения и подачи инструмента при лезвийной обработке резанием на станках с числовым программным управлением и адаптивными системами управления с использованием как нового подхода при моделировании как самого процесса, так и новых информационных параметров.

Ключевые слова: управление, нестационарность, резание металлов.

FEATURES OF MOVEMENT CONTROL IN NONSTATIONARY TURNING

The problem of motion control of main motion drives and the tool advance drives while the cutting machining by means of numerical control machine tool using a new approach to process modeling and new information parameters is considered.

Keywords: control, nonstationarity, metals cutting.

Современные условия машиностроения характеризуются существенной нестационарностью процессов резания, когда из-за изнашивания инструмента, колебания свойств обрабатываемого и инструментального материалов, многономенклатурности производства и переменности элементов режима обработки при автоматическом управлении происходит изменение температурно-силового режима формирования поверхностного

слоя и условий работы режущего клина инструмента. Практические рекомендации, используемые промышленностью, нестационарность процесса резания учитывают поправочными коэффициентами, снижающими, как правило, производительность и в ряде случаев ухудшающими точность обработки и другие выходные характеристики механической обработки.

Вместе с тем, эффективное использование мехатронных систем, оснащенных современными высокопроизводительными станками с числовым программным управлением (ЧПУ) и адаптивными системами управления (АдСУ), гибкими модулями с автоматизированными системами управления, и внедрение безлюдной технологии невозможно без решения практических задач управления нестационарным течением. Причем под нестационарным течением понимается обработка с переменными по определенному закону элементами режима резания.

Анализ использования адаптивных систем как предельного регулирования, так и оптимизации показал, что эти системы имеют общий недостаток, связанный с отсутствием комплексных физически обоснованных математических моделей управляемого процесса, и вместе с тем эффективность управления целиком определяется как качеством самой модели, степенью ее адекватности реальным условиям обработки, так и условиями значимости выбранных управляемых факторов.

Рассмотрим энергетическую зависимость [1] с учетом задач управления движением при нестационарном течении на станках с АдСУ и представим ее с рядом допущений в виде

$$\frac{P_z(\tau) \cdot v_i}{F_k} = C_\Theta \cdot \Theta(\tau) , \quad (1)$$

где $P_z(\tau), \Theta(\tau)$ – соответственно текущие значения тангенциальной составляющей силы (Н) и температуры резания (К); v_i – скорость резания на данный момент обработки, м/с; C_Θ – коэффициент пропорциональности; F_k – площадь контактных поверхностей инструмента с обрабатываемыми материалом и стружкой, м².

Известно [2], что основными факторами, определяющими электропроводимость контакта, являются площадь контакта (геометрический фактор) и удельные электропроводимости материалов детали и инструмента (температурный фактор). Причем действие последнего ослаблено в несколько раз влиянием явления сужения тока в зоне контакта из-за существенной разницы в размерах контакта «инструмент-деталь» и зоной, определяющей сопротивление (проводимость) электрического контакта.

Для использования термодинамической модели (1) и электрической проводимости контакта инструмент-деталь (ЭП КИД) в качестве информационного параметра в системах управления технологическим процессом резания были проведены серии экспериментальных исследований. Исследования ЭП КИД, температуры и силы резания, коэффициента усадки стружки и

других параметров при непрерывном изменении скорости и глубины резания, подачи инструмента в широком диапазоне по линейному закону с определенным темпом (ускорением) проводились на станках с ЧПУ, как при продольном, так и торцевом точении сталей и сплавов различной группы обрабатываемости (О7Х16Н6, 14Х17Н2, 12Х18Н9Т, 15Х18Н12С4ТЮ, ХН73МБТЮ и др.).

По результатам экспериментальных исследований установлено:

- при непрерывном линейном изменении скорости резания с положительным темпом ($a_v > 0$) привода главного движения составляющие силы резания (P_x, P_y, P_z) и ЭП КИД (G) монотонно убывают и стабилизируются, а при отрицательном темпе ($a_v < 0$) наоборот;

- температура резания Θ при положительном темпе ($a_v > 0$) монотонно возрастает, а при отрицательных значениях ($a_v < 0$) немонотонно убывает;

- существуют оптимальные темпы изменения скорости резания $(a_v)^{опт}$ и подачи инструмента $(a_s)^{опт}$ при нестационарном точении, когда обеспечивается баланс механической (левая часть) и тепловой энергии (правая часть) зависимости (1) и как следствие обеспечивающий минимум интенсивности износа режущего инструмента;

- зависимости для темпов изменения скорости резания a_v и подачи инструмента a_s имеют вид:

$$a_v = \left[\sqrt[3]{\frac{P_{z_0} \cdot v_i \cdot \tau \cdot \mu}{b(l_1 + C_1) \cdot C_\Theta \cdot \Theta_0}} \pm 1 \right] \cdot \frac{v_0}{\tau}, \quad (2)$$

$$a_s = \left[\sqrt[4]{\frac{C_\Theta \cdot \Theta_0 (l_1 + C_1) \cdot b}{P_{z_0} \cdot v_i \cdot \tau \cdot \mu}} \pm 1 \right] \cdot \frac{S_0}{\tau}, \quad (3)$$

где $P_{z_0}, \Theta_0, v_0, S_0$ – соответственно оптимальные значения силы, температуры, скорости резания и подачи инструмента; v_i, τ – соответственно величины текущих значений скорости резания и времени; μ – коэффициент трения; l_1, C_1, b – соответственно длина контакта по передней и задней поверхностям и ширина срезаемого слоя.

Решение термодинамической зависимости (1) относительно скорости резания v_i и с использованием ЭП КИД $G(\tau)$ можно представить в виде неравенства

$$v_i \leq \frac{C_\Theta \cdot \Theta(\tau) \cdot K \cdot G(\tau)}{P_z(\tau) \cdot \mu}, \quad (4)$$

где K – коэффициент пропорциональности между площадью контакта и ЭП КИД.

В целом по результатам работы на основе использования зависимостей (2)–(4) разработан алгоритм управления процессом нестационарного точения в поисковом режиме на станках с АдСУ, оснащенных контурами

управления по термо-ЭДС, силами резания и ЭП КИД путем введения дополнительного контура управления скоростью резания с оптимальными величинами темпа их изменения во времени.

Библиографический список

1. Мигранов, М.Ш. Разработка математических моделей контактных процессов для управления мехатронными станочными системами / М.Ш. Мигранов, Л.Ш. Шустер, В.В. Постнов // Новые технологии управления движением технических объектов. 2-я Междунар. науч.-техн. конф. Новочеркасск, 1999. С. 146.
2. Зориктуев, В.Ц. Идентификация и автоматическое управление технологическими процессами в станочных системах / В.Ц. Зориктуев. Уфа: УАИ, 1992. 114 с.
3. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

УДК 537.874.2

А.В. Мишина
Тверской государственный технический университет,
А.Д. Мишин
Московский государственный университет им. Ломоносова

МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ С ПЕРЕОТРАЖЕНИЕМ В ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Рассматривается численный метод поэтапной фильтрации сигналов с переотражением, основанный на комбинировании метода последовательных приближений и Фурье-анализе.

Ключевые слова: фильтрация сигналов, переотражение.

THE FILTERING METHOD FOR OPTICAL SIGNALS WITH SUPERPOSED REFLECTION IN OPTICAL SPECTROSCOPY

We demonstrate the numerical stepwise filtering method for optical signals with superposed reflection based on the combination of method of successive approximations and Fourier analysis.

Keywords: filtration of signals, optical re-reflection.

При решении экспериментальных задач, связанных с детектированием сигналов, часто приходится сталкиваться с проблемой искажения исследуемых электромагнитных волн. В частности, факт наложения отражений на регистрируемый сигнал в той или иной степени изменяет его форму и длительность. Наиболее значима эта проблема в лазерной оптике, когда излучение, проходя через оптические элементы экспериментальной установки, отражается от их тщательно отполированных поверхностей и накладывается на первоначальную волну.

Особенно ярко последствия этих переотражений проявляются в оптической спектроскопии, где детектируемый сигнал несет информацию о

структуре исследуемого вещества либо является основой дальнейшего эксперимента. Переотражения в значительной степени искажают спектр сигнала, рассчитываемый, как правило, методом Фурье-преобразования. Для решения проблемы уменьшения влияния переотражений используют экспериментальные и математические методы.

Для минимизации переотражений в экспериментальной установке могут использоваться поглощающие элементы, что, как правило, уменьшает интенсивность исходного сигнала. Иногда проводится слабая разъюстировка элементов экспериментальной схемы, которые вызывают переотражения, с целью отведения последних от полезного сигнала. Могут также применяться дополнительные оптические элементы для разведения проходящего и отраженного лучей, например, стеклянные призмы со скошенной гранью. Зачастую, особенно если в эксперименте не важна поляризация сигнала или же она линейна, ориентируют оптические элементы под углом Брюстера по отношению к падающему сигналу, чтобы минимизировать отражение.

В основе предлагаемого нами численного алгоритма используется один из наиболее распространенных методов математической обработки сигнала – оконное преобразование Фурье:

$$F(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) W(\tau - t) e^{-i\omega\tau} d\tau,$$

где $W(\tau - t)$ – некоторая оконная функция. При этом из всего исследуемого сигнала выделяется определенная временная часть, которая затем используется для расчета спектра.

Предполагается, что анализируемый сигнал имеет импульсный осциллирующий выражено затухающий во времени вид, и момент наложения первого переотражения можно отследить по резко возрастающей амплитуде колебаний. В качестве случая, для которого может применяться данный численный метод, можно рассмотреть возникновение возможного переотражения (рис. 1) в схеме терагерцовой спектроскопии временного разрешения (далее ТСВР), используемой в работах [1, 2]. Эта схема применяется для построения частотных спектров по временным зависимостям регистрируемого оптического сигнала. В таких схемах ТСВР могут возникнуть переотражения как оптических, так и терагерцовых импульсов в различных используемых оптических элементах. При этом возникающие переотражения, как уже описывалось выше, способны внести значительные искажения в рассчитываемый терагерцовый спектр.

На первом этапе приближений считаем, что нам известна длина и коэффициент преломления используемого кристалла, в котором возникли переотражения. Также предполагаем, что среда изотропна и недисперсна, коэффициенты отражения и преломления одинаковы для всех частот.

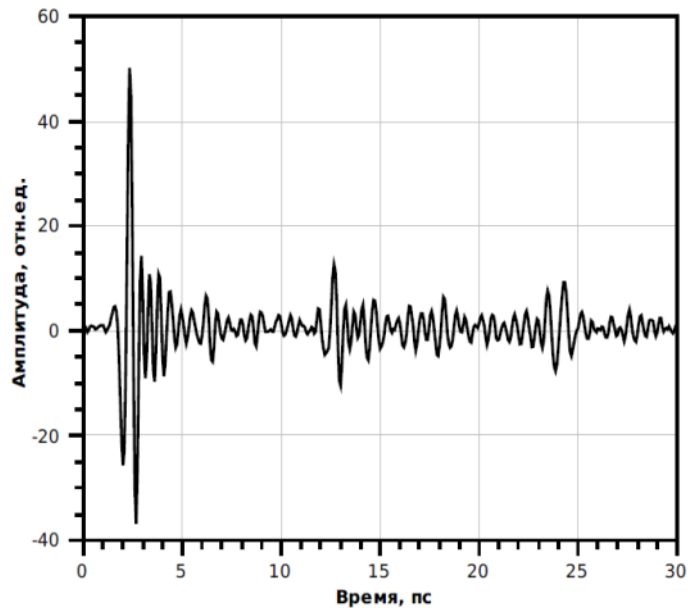


Рис. 1. Терагерцовый сигнал с переотражениями [2]

На первом шаге алгоритма аналитически вычисляется примерное время задержки вторичного сигнала, соответствующего времени его прохождения через кристалл туда и обратно для уточнения времени начала переотражения. Далее применяется преобразование Фурье для временного интервала строго до начала переотражений (рис. 2а), увеличиваем в два раза разрешение частотного спектра и применяем обратное преобразование Фурье, что позволяет получить сигнал без переотражений на удвоенном временном промежутке приблизительно в том же диапазоне частот. Имеем первое приближение анализируемого сигнала (рис. 2б).

На втором шаге на временном интервале переотражений вычитаем из исходного сигнала (рис. 2а) соответствующий сигнал, полученный в первом приближении (рис. 2б). Вычисляем усредненный фазовый сдвиг и усредненный коэффициент ослабления амплитуды переотражения. С их учетом восстанавливаем второе приближение анализируемого сигнала.

На третьем шаге применяем прямое преобразование Фурье к полученному сигналу на удвоенной длине кристалла и усредняем спектральную характеристику с полученной ранее. Обратное преобразование Фурье дает третье приближение исследуемого сигнала.

Далее применяются итерации, состоящие из второго и третьего шага. Критерием окончания итераций служит возможно достижимый минимум сходимости спектров. Дальнейшие этапы предполагают учет последующих переотражений и дисперсионных свойств среды кристалла.

Тестовый результат работы программы, реализующей данный метод, представлен на рис. 2в.

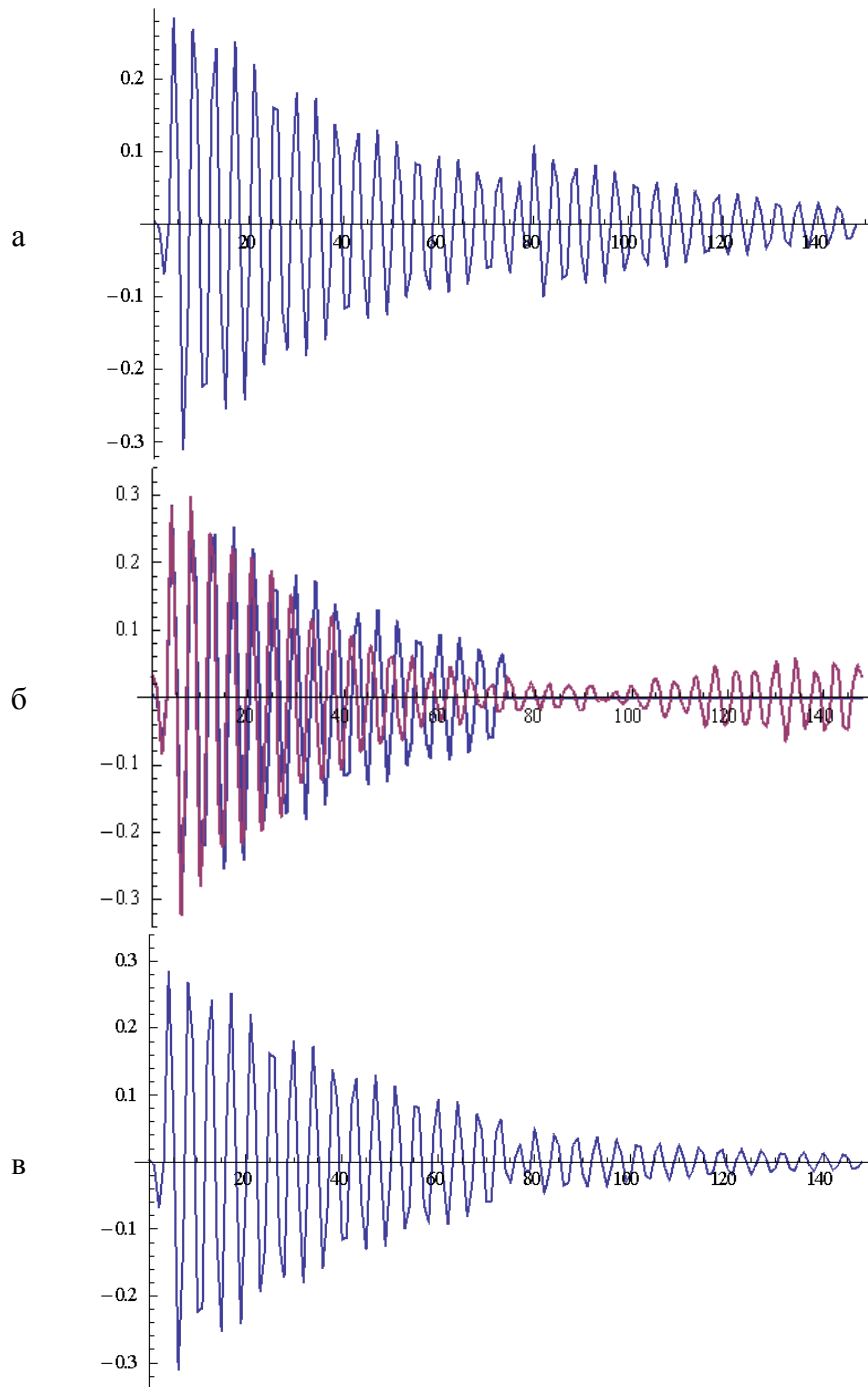


Рис. 2. Тестируемый сигнал с переотражением (а); приближение после первого шага (б); отфильтрованный сигнал (в)

Библиографический список

1. Kitaeva, G. Kh. Terahertz wave generation in periodically poled lithium niobate crystals fabricated using two alternative techniques / G.Kh. Kitaeva, S.P. Kovalev, I.I. Naumova, A.N. Tuchak, P.V. Yakunin, Y-C Huang, E.D. Mishina and A.S. Sigov // *Laser Physics Letters*. 2013. V. 10. № 055404.

2. Ковалев, С.П. Генерация и детектирование терагерцового излучения при накачке периодически поляризованных кристаллов фемтосекундными лазерными импульсами: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / С.П. Ковалев. М., 2012. 20 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>МЕХАНИКА И ФИЗИКА ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА</i>	
В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, М.П. Вильмс Фрикционное взаимодействие в металлическом контакте с тонкими пленками жирных кислот на поверхности контактирующих тел	4
В.М. Сербин Особенности контактного взаимодействия резин с абразивом в водной среде	14
И.И. Беркович, Ю.И. Морозова Связь между силами натяжения в ветвях нити, тканой и сплошной лент	21
В.В. Мешков, Д.А. Зоренко САЕ-моделирование температурных полей поверхности трения с учетом экспериментально определенной субмикрogeометрии	25
А.Н. Болотов, О.В. Сутягин, А.А. Рачишкин Компьютерное моделирование топографии трехмерных шероховатых поверхностей	29
В.В. Измайлов, Д.А. Левыкин Теоретическое и экспериментальное исследование фреттинг-изнашивания на примере единичного контакта	42
О.В. Сутягин, М.В. Васильев Контактное взаимодействие поверхностей с покрытиями изделий машиностроения. Часть 1. Аналитические методы теории упругости	48
О.В. Сутягин, М.В. Васильев Контактное взаимодействие поверхностей с покрытиями изделий машиностроения. Часть 2. Аналитические методы теории пластичности, приближенный анализ упругопластического контакта, метод конечных элементов	56
Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов, В.Г. Прохоров Расчет упругопластической контактной деформации	62
Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов Факторы, влияющие на характеристики упругопластического контакта	65
<i>ТРИБОТЕХНИКА И ТРИБОТЕХНОЛОГИИ</i>	
Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина Способы повышения надежности неподвижных соединений	68
И.В. Горлов, А.Н. Болотов, В.В. Мешков, А.И. Горлов Устройство для испытания материалов для тяжело нагруженных узлов трения	73

И.В. Горлов, А.Н. Болотов, В.В. Мешков, Д.И. Горлов Испытание материалов для тяжело нагруженных узлов трения	81
А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова, Д.И. Горлов Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 2	85
М.Ш. Мигранов, А.М. Мигранов Исследование эксплуатационных свойств новых марок технологического смазочного материала	89

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.А. Барчуков Влияние химического состава быстрорежущей стали на процессы ее упрочнения в результате отпуска, выполняемого после поверхностного пластического деформирования	92
А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова Определение микротвердости тонких ионно-плазменных нитридных покрытий на металлических подложках	97
Д.Г. Масленников, А.В. Кондратьев, Ю.Н. Павлов Исследование прочностных характеристик брикетов из сухой асфальтобетонной смеси	103
А.Ю. Лаврентьев, И.А. Соколов, А.М. Дожделев, А.А. Хохлов Изготовление зенкеров с повышенными эксплуатационными характеристиками для получения отверстий в изделиях из труднообрабатываемых материалов	106
А.Ю. Лаврентьев, С.П. Рыков Получение биметаллических износостойких материалов для патрубков установок гидроабразивной обработки	110
В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, Д.А. Романов Исследование закономерности распределения значений магнитного показателя при статическом растяжении образцов из стали Ст3	113
Ю.А. Соколов, Л.Е. Афанасьева, М.В. Новоселова, Р.М. Гречишкин Триботехнические свойства сплава титана, полученного по технологии синтеза изделий электронным лучом	118
А.М. Дожделев Применение быстрорежущих сталей для изготовления металлорежущего инструмента	124
Р.М. Киреев, М.Ш. Мигранов Синтез наноструктурированных покрытий из нитридов и карбидов интерметаллида систем Ti-Al	128

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
И ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
НА СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

А.П. Архаров, К.С. Любимов Измерение отклонений расположения плоскостей относительно центра наружной сферической поверхности	133
В.А. Русинкевич, А.В. Кондратьев, С.М. Кочканян, А.И. Перхуров Определение влияния поперечного и продольного углов наклона валковой желобообразной сортировки на эффективность и время грохочения гравия	135
А.В. Кондратьев, С.М. Кочканян, В.А. Русинкевич, А.К. Абдуллах Просеиваемость гравия по длине сортировки в зависимости от фракционного состава смеси	139
В.В. Смирнов Автоматизация управления специальными станками в условиях машиностроительного производства	143
А.С. Енин, К.Б. Корнеев, Т.И. Узикова Специфические аспекты тепловизионного контроля электроконтактных соединений	145
Э.В. Ключко К вопросу о расчетах геометрической точности механических систем	149
Е.В. Полетаева Требования, предъявляемые к онтологии в области машиностроения, при автоматизации технологического проектирования	155
Е.В. Полетаева, М.П. Вильмс Синтез символьной и графической составляющих при автоматизации технологического проектирования в области машиностроения	158
В.Г. Прохоров, Г.И. Рогозин Влияние геометрии базовой поверхности обрабатываемой детали и схемы ее расположения на точность металлообработки резанием	163
Г.Б. Бурдо, Б.В. Палюх, Е.В. Воробьева Методологические основы построения САПР ТП с развивающейся базой знаний	169
Г.Б. Бурдо, А.Ю. Сорокин Критерии оценки качества изделия в автоматизированной системе управления качеством	174
Г.Б. Бурдо, Н.А. Семенов, И.С. Конькова, А.В. Федотова Управление работой технологических подразделений со стационарными обслуживаемыми объектами в АСУТП	181

Г.Б. Бурдо, А.А. Исаев, В.Г. Бурдо, Р.З. Диланян Согласованное формирование целевой функции при технологической подготовке в многономенклатурном производстве	187
А.Н. Макаров, В.В. Рыбакова Реконструкция плазменно-дуговой сталеплавильной печи	196
А.Н. Макаров, А.В. Кузнецов, М.К. Галичева Инновационные рекуперативные нагревательные колодцы	200
А.Ю. Русин, Абдулхамед Мохаммед Параметрическая оценка показателей надежности при ускоренных испытаниях оборудования	207
А.Г. Савин Аналитический метод расчета пускового реостата для асинхронного двигателя с фазным ротором	215
Р.З. Диланян Модель производственной среды как основа проектирования групповых операций	219
Г.Б. Бурдо, Н.А. Семенов, И.С. Конькова, А.В. Федотова Принципы построения АСУТП сборки и обслуживания изделий	222
Г.Б. Бурдо, А.А. Исаев, Н.В. Испирян, С.Р. Испирян Проектирование в САПР ТП на основе распознавания производственной ситуации	227
Г.И. Рогозин, Ф.Х. Арсланов, В.Г. Прохоров Выбор посадок с натягом	231
В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, С.А. Потапов, П.Ю. Калабин Поиск оптимальных размеров поперечных сечений главных балок мостовых кранов	234
В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников, А.Д. Горынин Система анализа риска возникновения отказов мостового крана	239
В.Ю. Анцев, А.Н. Шафорост Оптимизация структур транспортно-складских систем механосборочного производства	245
С.Д. Семеенков, В.В. Шелгунов Использование пульпы для очистки от отложений трубопроводов систем гидрозолоудаления тепловых электростанций	250
И.В. Горлов, С.П. Рыков Последствия отказа технологических машин при фрезерной добыче торфа	255
М.Ш. Мигранов Особенности управления движением при нестационарном течении	261
А.В. Мишина, А.Д. Мишин Метод фильтрации сигналов с переотражением в оптической спектроскопии	264

**МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ
НА ПОВЕРХНОСТИ И В КОНТАКТЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ,
ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

Межвузовский сборник научных трудов
Выпуск 7

Сборник издается в авторской редакции
Ответственный редактор В.В. Измайлов
Технический редактор

Подписано в печать

Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 17,25

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л.

Заказ №

Бумага писчая

Уч.-изд. л.

С –

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22