

ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 3 (86)' 2024



ДОНЕЦК - 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Международный сборник научных трудов

Основан в декабре 1994 года

Выходит 4 раза в год

Выпуск 3 (86)' 2024

Донецк – 2024

В международном сборнике научных работ приведены некоторые вопросы теории и практики обработки изделий прогрессивными методами, показаны достижения и пути развития технологического оборудования, оснастки, металлорежущего инструмента и нанесения специальных покрытий на изделия машиностроения. Рассмотрены отдельные аспекты автоматизации производственных процессов и надежности технологического оборудования. Освещены современные проблемы материаловедения в машиностроении.

В данном сборнике публикуются ученые и ведущие специалисты из различных стран мира. Предназначен для научно-технических работников, ИТР и специалистов в области машиностроения.

Учредитель и издатель – ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (Свидетельство о государственной регистрации юридического лица от 07.04.2016 г. № 029192 серия АА03).

Издается при содействии **Донецкого регионального отделения «Союз машиностроителей России»**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Михайлов А.Н. (гл. редактор) (ДНР), Горобец И.А. (зам. гл. редактора) (ДНР), Лахин А.М. (секретарь) (ДНР), Баласанян Б.С. (Армения), Бахадиров Г.А. (Узбекистан), Брешев В.Е. (ЛНР), Бутенко В.И. (РФ), Витренко В.А. (ЛНР), Мазуру С. (Молдова), Овчинников Е.В. (Беларусь), Пантеленко Ф.И. (Беларусь), Поветкин В.В. (Казахстан), Суслов А.Г.(РФ), Тока А. (Молдова), Хандожко А.В. (РФ)

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58,
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра «Технология машиностроения». **Тел.:** +7-856- 301-08-40. **E-mail:** tm@fimm.donntu.ru

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики. Свидетельство о регистрации СМИ от 20 апреля 2017 г., серия ААА № 000125.

Сборник включен в перечень рецензируемых изданий ВАК ДНР (приказ №744 от 24.07.2017 г.), в котором могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, а также в базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования, лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)

ISSN 2073-3216

ISSN 2518-7120 (E)

УДК 621.952

А. В. Баранов, А. А. Воронцов, А. Е. Шереметьев

(РГАТУ имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Россия)

Тел.: +79108141404; E-mail: alexbar57@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬЮ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрено расчетное нахождение параметров, определяющих технологическую наследственность при обработке отверстий, и возможность управления процессом технологического наследования.

Ключевые слова: сверление, увод, ось отверстия, глубина и степень наклепа, технологическая наследственность

A. V. Baranov, A. A. Vorontsov, A. E. Sheremetev

CONTROL OF TECHNOLOGICAL HEREDITY DURING MACHINING OF HOLES IN GAS TURBINE ENGINE PARTS

The calculation of finding the parameters that determine technological inheritance when processing holes and the possibility of controlling the process of technological inheritance is considered.

Keywords: drilling, withdrawal, hole axis, depth and degree of hardening, technological heredity

1. Введение

При создании новых авиационных газотурбинных двигателей конструкторские решения, как правило, принимаются в результате поиска оптимума в многоэкстремальных задачах [1]. При этом учитываются такие подчас противоречивые факторы, как необходимость обеспечения заданных прочностных показателей, выбор материалов с определёнными свойствами и технологических процессов с учётом влияния технологической наследственности, которая, как известно, представляет собой явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим. Носителями наследственной информации является собственно материал детали, а также ее поверхности с многообразием параметров, описывающих состояние этих поверхностей. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции, в ходе которых они могут менять свои свойства частично или полностью. Для обеспечения качественных показателей деталей машин следует управлять процессом технологического наследования. На этапе механической обработки – выбирать наиболее рациональные режимы обработки. Уровень технологического процесса должен обеспечивать выполнение задач по достижению необходимых показателей качества. Нельзя старыми методами изготовить изделие с повышенными требованиями к его параметрам. При обработке отверстий значительный эффект достигается при использовании новых конструкций свёрл, позволяющих резко увеличить производительность обработки при достижении наилучшего качества поверхности и точности обработки [2].

2. Основное содержание и результаты работы

Выбирая расчетным путем наиболее рациональные режимы резания с оптимизацией их по двум критериям: критерию гарантированного получения требуемого качества и экономическому показателю в виде максимальной производительности v_n , максимальной размерной стойкости v_0 (при работе на которой

в зоне резания достигается оптимальная температура резания θ_0 для данной пары «инструментальный – обрабатываемый материал» [2, 3, 4]) или минимальной технологической себестоимости (v_3), при этом $v_0 < v_3 < v_n$, удаётся обеспечить как наиболее благоприятные показатели качества поверхностного слоя, так и точность отверстия [2, 4, 5, 6]. Чтобы управлять процессом технологического наследования при обработке отверстий, требуется надёжный математический аппарат, максимально учитывающий особенности процесса резания на данной операции.

Особенно с точки зрения технологической наследственности при обработке отверстий выделяется операция сверления. На этой операции значительны увод сверла и наклёп обработанной поверхности, во многом определяемые возникающими при обработке силами резания.

Рассмотрим схему (рис. 1), позволяющую выйти на расчётное определение составляющих сил резания.

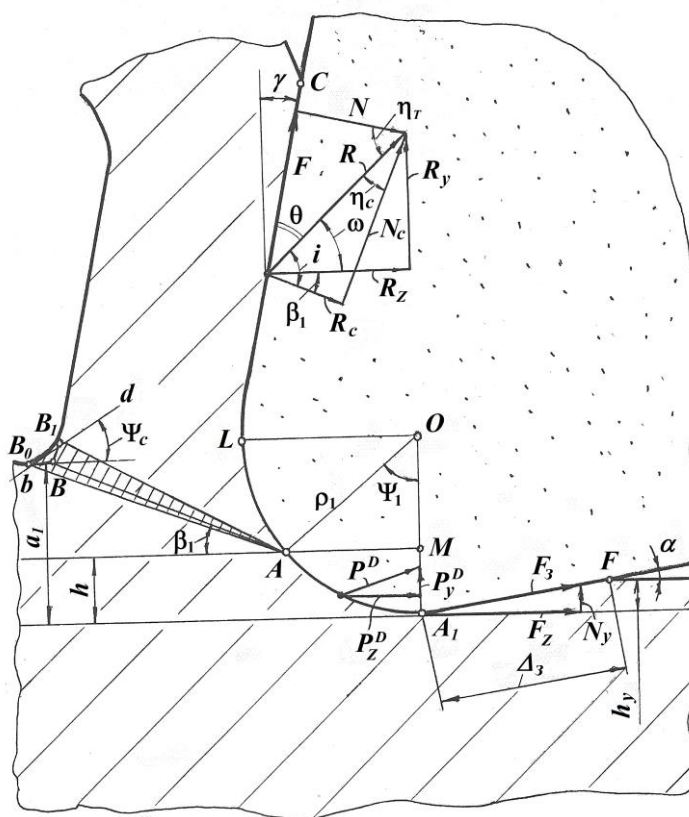


Рисунок 1. Схема к расчету сил резания

Здесь представлены следующие параметры процесса резания: $R_c = \tau_p a_1 b_1 / \sin \beta_1$ – сила пластического сдвига элементов стружки, H ; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, H/m^2 ; a_1 и b_1 – соответственно, толщина и ширина среза, m ; β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига, rad ; γ и α – среднеинтегральные значения переднего и заднего углов зуба инструмента (режущего лезвия), rad ; F – сила трения и пластических деформаций стружки по передней поверхности зуба инструмента, H ; N – нормальная к передней поверхности зуба сила, H ; R – сила стружкообразования (равнодействующая сил F и N), H ; N_c – нормальная к плоскости сдвига сила, определяющая внутреннее трение в плоскости AB , H ; η_c – угол

трения в плоскости сдвига (между силами R и N_c), рад; η_t – угол трения на передней поверхности инструмента (между силами R и N), рад; θ – угол трения между силами R и F , H ; R_z – горизонтальная составляющая силы стружкообразования, Н; R_y – вертикальная составляющая силы стружкообразования, Н; ω – угол, заключенный между силами R и R_z , рад; Ψ_c – угол наклона касательной к наружной границе, рад. Участок режущей кромки AA_1 будет сминать слой обрабатываемого материала высотой h . В результате смятия металл упругопластически деформируется, а режущая кромка испытывает дополнительную силу P^D , действующую со стороны обрабатываемого материала. F_3 – сила трения на участке A_1F задней поверхности режущего лезвия.

В общем случае зона стружкообразования является объемной и заключена в границах AB_0B_1A . Подробное рассмотрение процесса резания с учетом схемы, представленной на рис. 1, позволило с высокой степенью точности определять величины составляющих силы резания с учётом сил смятия металла участком режущей кромки AA_1 [4].

В результате теоретического анализа механики резания, учета смятия металла радиусной частью режущей кромки инструмента были получены [4] аналитические формулы для расчета составляющих силы резания: тангенциальной P_z , радиальной P_y и осевой P_x .

Известно, что наиболее заметно увод оси проявляется при сверлении отверстий спиральными свёрлами, при работе зенкеров – проявление увода мало заметно, а развёртка просто копирует уже имеющийся увод оси отверстия. Возникновение увода, прежде всего, обусловлено неуравновешенной радиальной силой ΔP_y и изгибающим моментом $M_{изг\Sigma}$ от ΔP_x (рис. 2), определяемыми аналитически. Исходим из того, что для расчета максимально возможного отклонения инструмента можно считать их совпадающими по направлению действия.

В идеальном случае для спирального сверла при симметрично расположенных зубьях силы P_{y1} и P_{y2} взаимно уравниваются (тоже относится и к силам P_{x1} и P_{x2}), однако все осевые лезвийные инструменты выпускаются с определенными величинами как радиального, так и осевого биения режущих кромок, регламентируемых соответствующими стандартами. Это и обуславливает несколько отличающиеся величины ширины b_1 и толщины a_1 среза, а, следовательно, и составляющих сил резания для рассматриваемых лезвий [4].

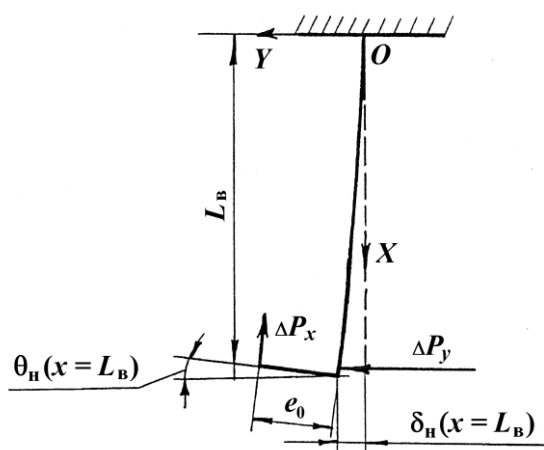


Рисунок 2. Схема к расчету увода оси отверстия

Неуравновешенная сила ΔP_y при этом определяется выражением:

$$\Delta P_y = |P_{y1} - P_{y2}| + |P_{y1п} - P_{y2п}|, \quad (1)$$

где величины сил P_{y1} и P_{y2} , $P_{y1п}$ и $P_{y2п}$ (индекс «п» указывает на принадлежность к перемычке) подсчитываются с учетом величины допустимого биения для рассматриваемого инструмента.

Величина увода оси отверстия δ_k не должна превышать допустимую, исходя из требований по точности обработки отверстия $\delta_{кт}$, определяемую из величин допусков параллельности, перпендикулярности оси и др.

$$\delta_k \leq \delta_{кт}, \quad (2)$$

В противном случае необходимо использовать инструмент более точного исполнения, предельно уменьшить его вылет, применять сверла повышенной жесткости. В ряде случаев можно идти путем корректировки геометрии (в частности, уменьшения угла φ) или снижения подачи инструмента при поддержании оптимальной скорости резания. Все это может быть определено расчетным путем, то есть речь идет об управлении точностью выполняемой операции.

Как показали экспериментальные исследования, полученные расчётные зависимости с достаточной для практических целей точностью могут быть использованы применительно к процессам сверления (рис. 3).



Рисунок 3. Зависимость увода сверла от глубины обрабатываемого отверстия:
1X12H2BMФ – P9K5; $d = 10$ мм; $s_0 = 0,14$ мм/об

Для получения аналитических зависимостей по определению глубины наклепа h_n при механической обработке отверстий лезвийным осевым инструментом в качестве исходной может быть использована расчетная методика, разработанная В.А. Козловым. Используя данный подход, и учитывая процесс подмятия металла радиусной зоной режущей кромки, получено следующее выражение для определения глубины наклепанного слоя $h_{н0}$, возникающего при работе с оптимальными скоростями v_0 , применительно к процессу сверления [4]:

$$\frac{h_{н0}}{a_1} = \frac{0,25(\tau_p/\sigma_t)(\rho_1/a_1)^{0,14}}{B^f(\operatorname{tg}\eta)^{0,58} \cdot K_{н1}}, \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, Па; $f = 1,38(\operatorname{tg} \eta)^{0,17}$; $K_{H1} = 1$ при $K_{H2} \geq 1$; $K_{H1} = K_{H2}$ при $K_{H2} < 1$; K_{H2} – безразмерный коэффициент, определяемый аналитически, представляющий собой отношение глубины наклепанного слоя, формируемого под воздействием сил стружкообразования и подмятия металла на радиусном (ρ_1) участке режущей кромки (рис. 1) к глубине наклепанного слоя, формируемого под воздействием сил трения со стороны задней поверхности зуба.

Анализ выражения позволяет сделать следующий вывод: при сверлении отверстий с оптимальной по износостойкости инструмента скоростью резания глубина наклепанного слоя возрастает с увеличением пластических свойств обрабатываемых материалов, подачи и диаметра отверстия, радиуса округления режущей кромки зуба (лезвия) инструмента, а также величины износа зубьев по задней поверхности.

Учитывая полученные аналитические зависимости можно выйти [4] на установление предельного значения износа зуба по задней поверхности $\delta_{и.пр}$, начиная с которого дальнейший износ будет существенно увеличивать глубину наклепанного слоя.

Расчетные зависимости могут быть использованы для определения предельно допустимой величины износа по задней поверхности лезвий сверла в ответственных деталях из жаропрочных и жаростойких материалов, предназначенных для длительной работы в высокотемпературных условиях, где глубина наклепанного слоя должна быть минимальной.

Экспериментальные исследования упрочнения поверхностного слоя при обработке отверстий и обработка результатов методами теории подобия позволили установить [4] следующее соотношение между глубиной наклепа и скоростями резания:

$$\frac{h_H}{h_{HO}} = \left(\frac{v}{v_0} \right)^{0,79 \cdot m_H}, \quad (4)$$

где m_H определяется аналитически [4].

Выражение позволяет расчетным путем определять глубину наклепанного слоя для различных скоростей резания при сверлении, в частности для скоростей v_3 и v_H . Безразмерный комплекс $B = \operatorname{tg} \beta_1$ (определяется аналитически) также зависит от скорости, поэтому его следует рассчитывать применительно к рассматриваемой скорости v .

В работе [6] применительно к обработке отверстий осевым лезвийным инструментом была показана связь между глубиной и степенью наклепа поверхностного слоя N_H , формируемого при обработке конструкционных и жаропрочных сталей и сплавов как с оптимальной v_0 , так и со скоростями v_3 и v_H .

Проверка методами математической статистики подтвердила достоверность результатов исследований и адекватность полученных формул.

3. Заключение

Возможность расчётного определения параметров, связанных с технологической наследственностью, позволила гарантированно обеспечивать качество поверхности и точность получаемого отверстия [8]. Реализация исследований была представлена в виде методического, программно-математического обеспечения и практических рекомендаций по определению оптимальных по критериям качества и стоимости

режимов резания для операций сверления, что позволило управлять процессом технологического наследования и обеспечить их внедрение на ряде крупных машиностроительных предприятий страны [4, 8].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьев В. А., Кузнецов С. П., Гишваров А. С. и др. Испытания авиационных двигателей / под общ. ред. В. А. Григорьева и А. С. Гишварова. – М.: Машиностроение, 2009. – 504 с.
2. Баранов А. В. Обеспечение высокоэффективной обработки отверстий // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2008. – №7. – с.42-45.
3. Баранов А. В. Математическое обеспечение САПР режимов лезвийной обработки отверстий // Справочник. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение, 2009. – № 4. – с.28-30.
4. Баранов А. В. Оптимизация процессов лезвийной обработки отверстий [Текст] – Москва - Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 140 с.
5. Баранов А. В. Оптимизация лезвийной обработки отверстий на основе энергетических критериев // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2011. – №3. – с.47-50.
6. Безъязычный В. Ф., Баранов А. В. Расчетный метод определения глубины и степени наклепа при обработке отверстий лезвийным осевым инструментом // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. №6.– с.65-66.
7. Баранов А. В. Аналитический метод определения сил и температуры резания при сверлении // СТИН. – М.: Машиностроение, 2000. – №11. – с.31-34.
8. Баранов А. В. Надежность и диагностика технологических систем [Текст] – Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 148 с.

Поступила в редколлегию 05.02.2024 г.

УДК 621.833

А. М. Лахин, канд. техн. наук

(ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР, РФ)

E-mail: le.lax@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ МЕХАНИЗМА ГИТАРЫ ДЕЛЕНИЯ

В работе предложен способ модернизации конструкции зубодолбежного станка путем замены гитары деления устройством прямого привода долбяка, а также считывания и обработки угловых перемещений привода инструмента и заготовки. Предложенный способ упрощает наладку станка на нарезание колес с различным числом зубьев и существенно расширяет технологические возможности зубообрабатывающего оборудования.

Ключевые слова: зубчатое колесо, долбяк, станок, привод, передаточное отношение.

A. M. Lahin

INCREASING THE EFFICIENCY OF USE OF GEAR SHAPING MACHINES DUE TO MODERNIZATION OF THE DIVISION GUITAR MECHANISM

The work proposes a method for modernizing the design of a gear shaping machine by replacing the division guitar with a direct drive device for the shaper, as well as reading and processing the angular movements of the tool drive and the workpiece. The proposed method simplifies setting up a machine for cutting wheels with different numbers of teeth and significantly expands the technological capabilities of gear-processing equipment.

Keywords: gear wheel, cutter, machine tool, drive, gear ratio.

1. Введение

В настоящее время зубообработка является одной из наиболее трудоемких операций при изготовлении деталей с зубчатым венцом. Это обусловлено как высокой трудоёмкостью самих зубообрабатывающих операций, так и длительностью вспомогательного времени на настройку и наладку оборудования под заданные параметры зубчатого венца. При этом существующее зубообрабатывающее оборудование является достаточно сложным в наладке, требующим высокой квалификации наладчиков и больших затрат времени [4, 6, 8].

Метод обкатки, к которому относятся: зубодолбление, зубофрезерование червячной фрезой и зубострогание, является универсальным методом обработки, позволяющими выполнять формообразование зубьев зубчатых колес с любым числом зубьев, инструментом одного модуля. Кроме того, при обработке зубьев методом обкатки достигается форма профиля зуба наиболее близкая к теоретической, за счет чего достигаются меньшие погрешности по всем нормам точности [2].

Между тем, для обеспечения заданных параметров нарезаемого зубчатого колеса, требуется сложная настройка станка, связанная с частичной разборкой оборудования [6]. Это требуется для согласованности угловых перемещений заготовки относительно инструмента при заданном числе зубьев нарезаемого зубчатого колеса. При зубодолблении должно быть обеспечено угловое перемещение заготовки на угол, в соответствии с передаточным отношением нарезаемого колеса с долбяком. Для зубофрезерования червячной фрезой скорость круговой подачи должна быть уменьшена относительно скорости вращения фрезы в величину передаточного отношения заготовки с червячной фрезой. При зубострогании конических колес

поворот люльки также должен быть согласован с числом зубьев нарезаемого зубчатого колеса.

При классическом подходе настройка станков выполняется подбором сменных шестерен гитары деления [4]. При этом для каждого числа зубьев нарезаемого колеса требуется уникальный набор пар шестерен, что усложняет настройку и делает невозможным обработку колес с нестандартным числом зубьев.

Целью данной работы является расширение технологических возможностей зубообрабатывающих станков, работающих по методу обкатки, за счет модернизации их конструкции устройством электронной гитары деления.

Задачи: исследовать особенности зубодолбежных станков на предмет их возможной модернизации; предложить совершенствование конструкции механизма деления для обработки зубчатых колес с любым числом зубьев; предложить рациональные способы обработки зубьев предложенным способом.

2. Основное содержание и результаты работы

Зубодолбление является одним из наиболее универсальных методов зубообработки. Он позволяет нарезать зубья наружного, внутреннего зацепления, прямозубые, косозубые и шевронные зубчатые колеса, а также зубчатые блоки.

Кинематическая схема зубодолбежного станка 514 представлена на рис. 1.

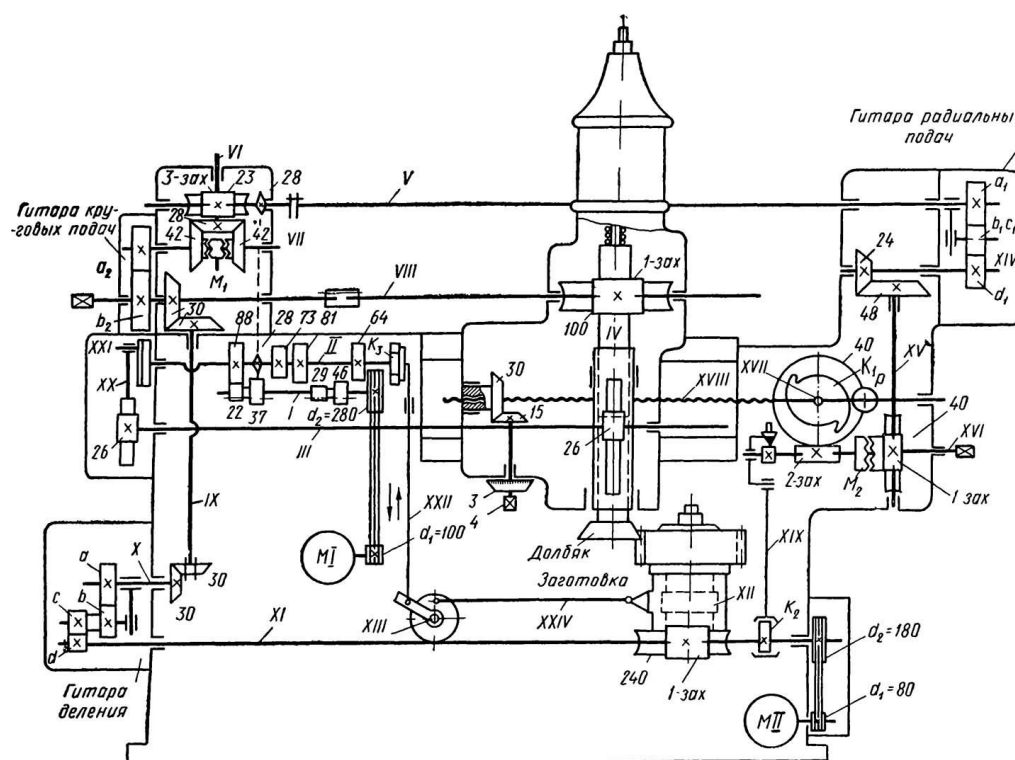


Рисунок 1. Кинематическая схема зубодолбежного станка 514

Данный станок можно условно разделить на 5 групп механизмов: привод главного движения шпинделя долбяка, механизм радиальной подачи долбяка, механизм круговой подачи долбяка, механизм движения деления заготовки и гитара деления. Вращательные движения: круговая подача долбяка и движение деления заготовки

должны быть строго согласованы за счет подбора пар шестерен $a-b$ и $c-d$. Связь между приводом круговой подачи инструмента и движения деления реализована с помощью конической передачи между валами VIII и X с помощью промежуточного вала IX. Движение на вал VIII передается через дифференциальный механизм M_1 и пары сменных шестерен a_2 и b_2 гитары круговых подач. Передача вращательного движения на шпиндель долбяка и шпиндель заготовки реализованы от червячных передач. Можно отметить, что точность сменных шестерен гитар деления и гитары круговых подач, должна обеспечивать минимальный боковой зазор, от которого на прямую зависит точность шага нарезаемых колес.

Исходная конструкция имеет большое количество кинематических цепей, требующих точной настройки. Наладка на обработку колес с иным числом зубьев требует смены шестерен на X и XI валах, что требует значительных затрат времени. Упрощения устройства трансмиссии зубодолбежного станка можно достичь за счет модернизации данного станка устройством электронной гитары деления, которая позволит исключить гитару круговых подач и гитару деления. При этом устройство связи угловых движений шпинделя долбяка и движения деления заготовки может быть реализовано с помощью электронного считывающего устройства угловых перемещений – энкодера. Данное устройство преобразует угловые перемещения вала привода вращения долбяка в электронные сигналы, которые обрабатываются в блоке управления. В настоящее время этот подход широко применяется для переоборудования токарных станков, используемых для нарезания резьбы [1]. Комплект для переоборудования металлорежущего станка устройством электронной гитары представлен на рис. 2.



Рисунок 2. Комплект для модернизации металлорежущего станка устройством электронной гитары

В комплект электронной гитары входят следующие составные части (рис. 2): 1 – цифровая панель управления с электронным блоком, 2 – драйвер шагового двигателя, 3- шаговый двигатель для привода заготовки, 4 – энкодер, 5 – шкивы и зубчатый ремень для передачи движения от шагового двигателя на ходовой вал, 6 -

соединительный кронштейн двигателя и ходового вала, 7 – импульсный блок питания, 8 – зубчатый шкив устанавливаемый на шпиндель станка.

Предложенный вариант модернизации зубодолбежного станка представлена на рис. 3.

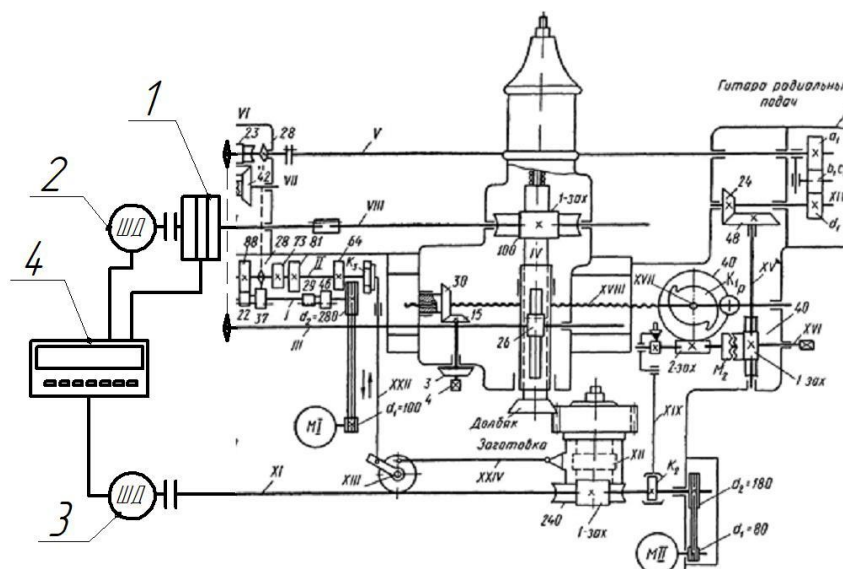


Рисунок 3. Модернизация трансмиссии зубодолбежного станка устройством электронной гитары деления

В представленной конструкции (рис.3) исключены гитара круговых подач а также гитара деления. Привод главного движения (возвратно-поступательное перемещение шпинделя с долбяком) реализовано от электродвигателя МI с коробкой скоростей на 3 ступени, и цепной передачей. Привод круговой подачи долбяка реализован от шагового электродвигателя 2, передающего движение через червячную передачу 1/100. На валу двигателя 2 также установлен энкодер 1, который фиксирует угловые перемещения вала VIII и преобразует их в электронный сигнал. Полученный сигнал в блоке управления 4 преобразуется в электронный импульс, задающий угловое перемещение шаговому электродвигателю 3, который через червячную пару 1/240 передает движение деления заготовке. Величина выходного сигнала настраивается в блоке управления 4 через меню команд. Вращение шагового электродвигателя 3 передается на червяк привода углового перемещения деления и через червячную передачу сообщается заготовке. Угол поворота заготовки за счет настройки в меню блока управления, будет равен:

$$\varphi_3 = 360 \cdot \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (1)$$

где Z_1 – число зубьев долбяка;

Z_2 – число зубьев нарезаемого зубчатого колеса.

Для задания требуемого угла поворота долбяка φ_d требуется поворот шагового двигателя 2 и вала VIII на следующих угол:

$$\varphi_{VIII} = \varphi_d \cdot i_{VIII-IV}, \quad (2)$$

где $i_{VIII-IV}$ – передаточное отношение червячной передачи на валу шпинделя долбяка. В случае станка 514, $i_{VIII-IV} = 100$.

Требуемый угол поворота вала XI, который должен быть обеспечен шаговым двигателем 3, будет следующим:

$$\varphi_{XI} = \varphi_3 \cdot i_{XI-XII}, \quad (3)$$

где φ_3 – угол поворота заготовка, определенный из соотношения (1);

i_{XI-XII} – передаточное отношение червячной передачи на валу заготовки. В случае станка 514, $i_{XI-XII} = 240$.

При нарезании зубчатого колеса с любым числом зубьев, соотношение между углами поворота шаговых двигателей 2 и 3 будет определяться следующим поправочным коэффициентом:

$$k = \frac{i_{VIII-IV}}{i_{XI-XII}} \cdot \frac{Z_2}{Z_1}. \quad (4)$$

Отношение $\frac{i_{VIII-IV}}{i_{XI-XII}}$ является конструктивной характеристикой станка, и в случае зубодолбежного станка 514 равна:

$$\frac{i_{VIII-IV}}{i_{XI-XII}} = \frac{100}{240} = 0,417.$$

Тогда поправка для угла поворота шагового двигателя поворота вала XI будет учитывать только передаточное отношение между долбяком и нарезаемым зубчатым колесом:

$$k = 0,417 \cdot \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (5)$$

где Z_1 – число зубьев долбяка;

Z_2 – число зубьев нарезаемого зубчатого колеса.

Полученная поправка является основной величиной для настройки зубодолбежного станка на нарезание заданного числа зубьев. Блок управления должен обеспечивать настройку данного коэффициента угловых перемещений

Данный станок может работать полностью в автоматическом режиме. В цикл работы данного станка входят следующие переходы:

- врезание долбяка с радиальной подачей на глубину зуба (при нарезании за один проход), или на глубину 1-го прохода; поворот долбяка и заготовки не осуществляется а долбяк совершает возвратно-поступательное движение с отскоком назад при холостом ходе;
- включение круговой подачи долбяка и движения деления заготовки; выполнение нарезания зубьев по кругу с отскоком долбяка при холостом ходе;
- остановка поворотного движения, радиальная подача долбяка на следующий проход;
- включение круговой подачи долбяка и движения деления на следующий проход.

Аналогичным образом можно выполнить модернизацию зубофрезерных станков, работающих по методу обката. В этом случае привод вращения фрезы, механизм вертикальной подачи, радиального перемещения стойки и тангенциального перемещения протяжного суппорта соответствуют исходной конструкции станка.

Тогда как исключается цепь обкатки (деления нарезаемого колеса). Движение обката будет реализована с помощью отдельного шагового двигателя, присоединенного к червяку передачи вращения заготовки. К валу шпинделя фрезы присоединяется энкодер связанный с блоком управления, с помощью которого будет настроено согласованное движение деления нарезаемой заготовки. При такой конструкции значительно упрощается кинематическая схема станка и отпадает необходимость использования сменных шестерен цепи деления, а также появляется возможность обработки зубчатых колес с любым числом зубьев.

Основной задачей конструктора и проектировщика металлообрабатывающего оборудования является разработка и программирование электронных устройств для преобразования сигналов и согласования угловых перемещений приводов вращения инструмента и заготовки [3]. Данная задача решается применением программируемых контролеров и устройств преобразования электронных сигналов в управляющие команды для элементов станка.

3. Заключение

Таким образом, в работе предложен способ модернизации конструкции зубодолбежного станка путем замены гитары деления на прямой привод поворота заготовки и долбяка с устройством считывания и обработки сигнала угловых перемещений. Данный способ значительно упрощает настройку станка на обработку зубчатых колес с любым числом зубьев, уменьшает погрешности в кинематических цепях станка и позволяет существенно снизить время на наладку и обслуживание зубообрабатывающих станков. Кроме того, предложенный способ требует гораздо меньших капиталозатрат по сравнению с использованием полноценных станков с ЧПУ при незначительных затратах на модернизацию действующего оборудования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лахин, А. М. Повышение технологических возможностей токарно-винторезных станков путем использования механизма электронной подачи / А. М. Лахин, О. В. Мороз, И. А. Горобец // Инженер: Студенческий научно-технический журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2023. - № 1 (35). - С.43-46.
2. Кудрявцев, В. Н. Зубчатые передачи [Текст] / В.Н. Кудрявцев // - М.: «Машгис», 1957. – 263 с.
3. Клепиков, В. В. Новые технологические решения и направления в производстве зубчатых колес [Текст] / В. В. Клепиков // СТИН. — 2002. — №2. — С. 30 — 33.
4. Калашников, А. С. Технология изготовления зубчатых колес [Текст] /А. С. Калашников// М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.
5. Лоскутов, В. В. Зубообрабатывающие станки [Текст] / В. В. Лоскутов, А. Г. Ничков // М.: Машиностроение -1978, - 192 с., ил.
6. Шавлюга, Н. И. Расчет и примеры наладок зубофрезерных и зубодолбежных станков [Текст] / Н. И. Шавлюга // Л.: Машиностроение – 1978, - 168 с.
7. Шепелева, И. Н. Обработка материалов резанием. Часть 2 [Текст] / И. Н. Шепелева [и др.]. – Красноярск: СибГТУ, 2012. – 212 с.
8. Гинзбург, Е. Г., Халебский Н. Т., Производство зубчатых колес [Текст] / Е. Г. Гинзбург, Н. Т. Халебский // Л.: «Машиностроение» 1978 г. – 136 с., ил.

Поступила в редколлегию 12.02.2024 г.

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., **С. Б. Котляров**, **В. Б. Котляров**,
Б. С. Котляров

(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, Россия),

Тел: +7 (988) 554-00-21; +7 (985) 021-79-06, +7 (964) 704-53-62;

E-mail: tm@fimm.donntu.org; boris.kotlyarov@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru

БЕЗСТРУЖЕЧНАЯ ДОВОДКА ОТВЕРСТИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ

В настоящей работе изложены результаты исследований и практического применения способа обработки отверстий под подшипники с применением метода раскатки шариками. на финишной операции. Предложен порядок предварительного расчета величины шероховатости в зависимости от диаметра шариков, количества шариков в оправке раскаточной головки, величины осевой подачи и числа оборотов при раскатке отверстий различного диаметра. Приведена эмпирическая формула, определяющая влияние различных факторов процесса на достигаемую степень чистоты и шероховатости поверхности.

Ключевые слова: раскатка, раскаточная головка, шероховатость поверхности, шаг следов раскатки, величина подачи, инструменты, формализация записи.

A. N. Mikhailov, S. B. Kotlyarov, V. B. Kotlyarov, B. S. Kotlyarov

BRUSHLESS FINISHING OF HIGH-PRECISION HOLES WITH IMPROVED SURFACE FINISH

This paper presents the results of research and practical application of the method for processing holes for bearings using the ball rolling method. at the final operation. A procedure for preliminary calculation of the roughness value depending on the diameter of the balls, the number of balls in the mandrel of the rolling head, the value of the axial feed and the number of revolutions when rolling holes of various diameters is proposed. An empirical formula is given. determining the influence of various process factors on the achieved degree of cleanliness and surface roughness.

Keywords: rolling, rolling head, surface roughness, step of rolling traces, feed rate, tools, recording formalization.

1. Введение

Комплексное технологическое обеспечение при изготовлении изделий и деталей машиностроительного назначения предполагает использование различных способов и видов технологического воздействия для формирования геометрии с указанной степенью точности и формирования требуемого качества поверхностей. Важным этапом обработки является доведение качественных характеристик детали до требований, предъявляемых конструкторскими документами.

В настоящее время в производстве применяется много различных финишных операций для достижения окончательных размеров детали и свойств поверхностного слоя [1, 2]. В настоящей работе рассмотрим вариант получения окончательного размера внутренней поверхности и качества поверхности уха под установку наружного кольца подшипника для карданного вала тепловозов серии ТГМ. Рассматриваемая деталь не подвергается термообработке, а окончательный размер отверстия под втулку достигается предварительным и окончательным растачиванием на расточном станке 2620.

В процессе обработки допускается некоторый процент отклонений показателей, как по размеру, так и по качеству поверхности отверстия [3].

Автором предпринята попытка повысить качество получаемых деталей за счет применения комплексной обработки путем включения на финишной операции доводки размеров отверстия методом пластической деформации поверхностного слоя.

С этой целью проведены аналитические исследования и проведен ряд расчетов по теоретическому обеспечению требуемого размера с достижением удовлетворительных результатов по обеспечению чистоты поверхности с шероховатостью не более Ra 1,6.

2. Цель и задачи

Цель настоящей работы состоит в разработке порядка предварительного расчета элементов технологического обеспечения при разработке комплексной технологии обработки деталей машиностроительного назначения, в том числе кардных валов трансмиссий тепловозов. В частности, рассматривается вопрос финишной обработки двух отверстий $\varnothing 105H7^{(+0,035)}$ мм под подшипники фланца 325.10.101 карданного вала при обеспечении показателей чистоты поверхности с шероховатостью не более Ra 1,6 мкм.

Для этого необходимо решить ряд частных задач:

1. Выполнить анализ технологического воздействия инструмента в виде шариков инструментальной головки на обрабатываемую поверхность детали в плане обеспечения размерной точности и повышения класса чистоты поверхности;
2. Установить формальную связь между параметрами инструмента и параметрами обрабатываемой поверхности, определяющие влияние на качество и точность обработки;
3. Разработать конструкцию раскатной головки;
4. Изготовить экспериментальную раскатную головку с шариками диаметром 20 мм в количестве 7 шт. с целью практической проверки результатов аналитических исследований и выводов относительно формирования конечных размеров с заданной точностью и достижении требуемого уровня шероховатости поверхности.

3. Основное содержание

Определение параметров процесса финишной обработки с одной установки поверхности 2-х соосных отверстий Ø105Н7^(+0,035) мм фланца в общем случае обуславливаются некоторой совокупностью факторов [4]. Некоторые показатели зависят от конструктивного решения раскатной головки, эскиз одного примера которой приведен на рис. 1, от количества применяемых шариков в головке, от величины оставляемого припуска под раскатку, от диаметра обрабатываемого отверстия и т. д.

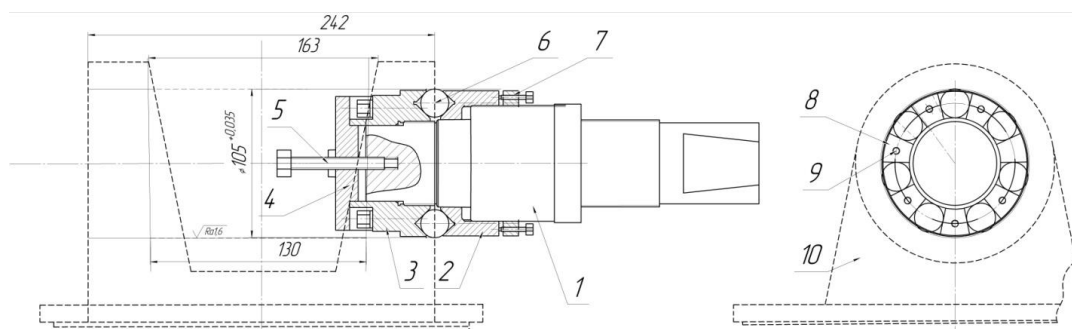


Рисунок 1. Эскиз головки раскатной на $\varnothing 105H7^{(+0,035)}$ мм

На рис. 1 основные детали головки обозначены позициями, где 1 – оправка головки; 2 – гайка-конус ограничительная; 3 – гайка-конус опорная; 4 – крышка упорная с регулирующим винтом; 5, 6 – шарик, выглаживающий; 7 – гайка, регулирующая; 8 – упор шарика, сепарирующий; 9 – винта упора, сепарирующего; 10 – деталь обрабатываемая.

Процесс раскатки отверстия поясняется схемой раскатки на рис. 2. В нашем случае применена головка с 7 раскаточными шариками. Общая схема расчета припуска определяется следующим порядком действий:

- устанавливается число оборотов раскатной головки – шпинделя станка;
- рассчитывается частный шаг гребенки – винтовых следов от шариков;
- вычисляется высота гребешков – вершин винтовых следов относительно номинальной поверхности отверстия;
- вычисляется минимальная и максимальная возможная высота гребешков относительно номинальной поверхности отверстия с учетом упругой деформации;
- определяется величина слоя смятия металла при раскатке;
- устанавливается величина припуска под раскатку с учетом поля допуска на размер;
- проверяется порядок расчета и фактически полученные величины.

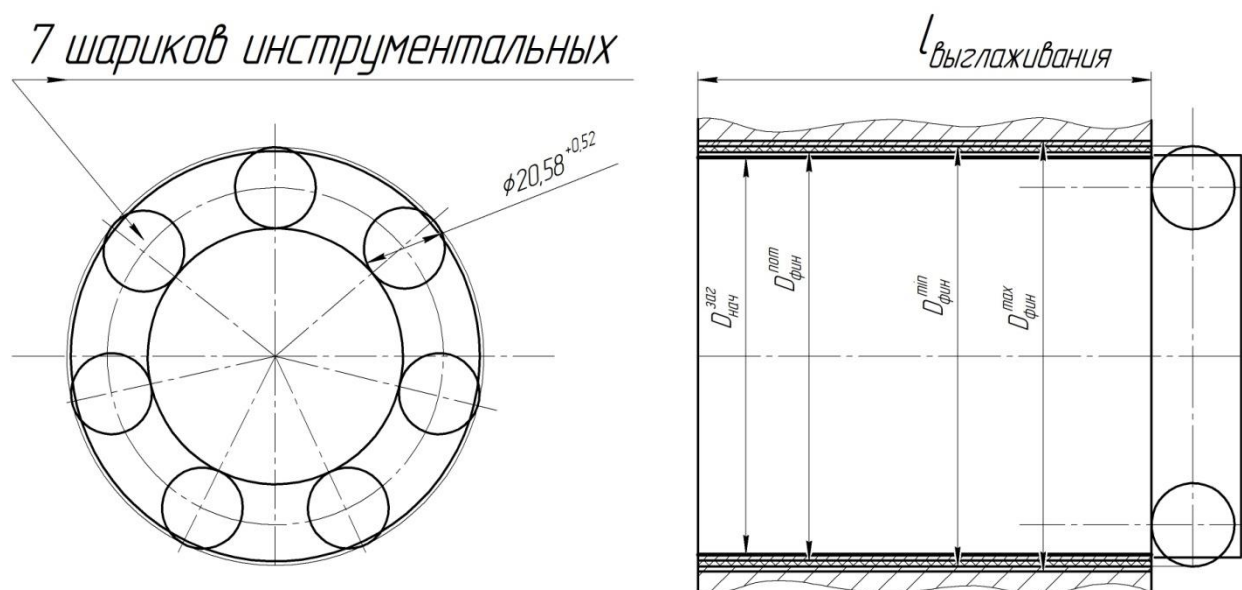


Рисунок 2. Схема раскатки отверстия $\phi 105\text{H}7^{(+0,035)} \text{ мм}$

На рис. 3 приведена схема распределения и смятия металла при раскатке, где указаны профили инструментальных шариков, следы гребешков винтовой линии, схема последовательного уменьшения высоты гребней при последовательном прохождении шариков при заданной осевой подаче станка.

На рис. 3 указаны формально все преобразуемые размеры отверстия при обработке поверхности отверстия деформационным способом. Размер t_{oc} указывает на шаг перемещения одного шарика при заданной осевой подаче при раскатке отверстия. Величина $1/nt_{oc}$ указывает на шаг винтового гребня при применении n шариков в головке раскатной при той же осевой подаче шпинделя. Увеличение числа шариков в

составе головки позволяет применять большее значение осевой подачи, что позволяет увеличивать производительность осуществления процесса раскатки.

Схема, иллюстрирующая порядок расчета величины выступов и гребней на обработанной поверхности детали, определяющих класс чистоты поверхности, приведена на рис. 4. На рис. 4 схематично указана шероховатость предварительной расточки отверстия до раскатки, а также шероховатость и высоту неровностей поверхности после выполнения раскатки.

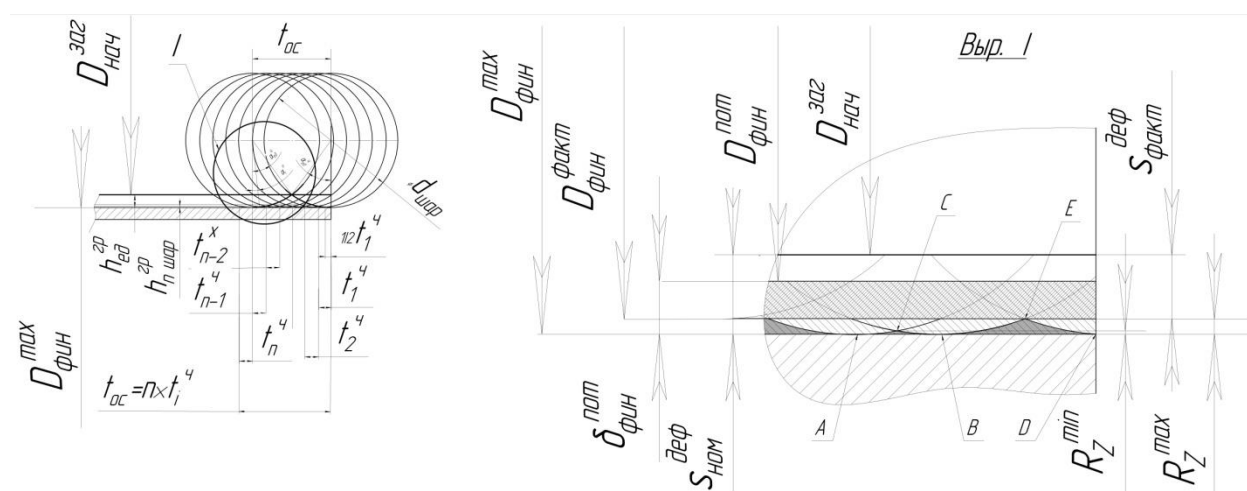


Рисунок 3. Схема расчета припуска под раскатку

Основной эффект снижения шероховатости достигается за счет смятия вершин выступов после предварительной обработки и заполнения металлом свободных зон в металле с большим значением вершин неровностей [4, 5].

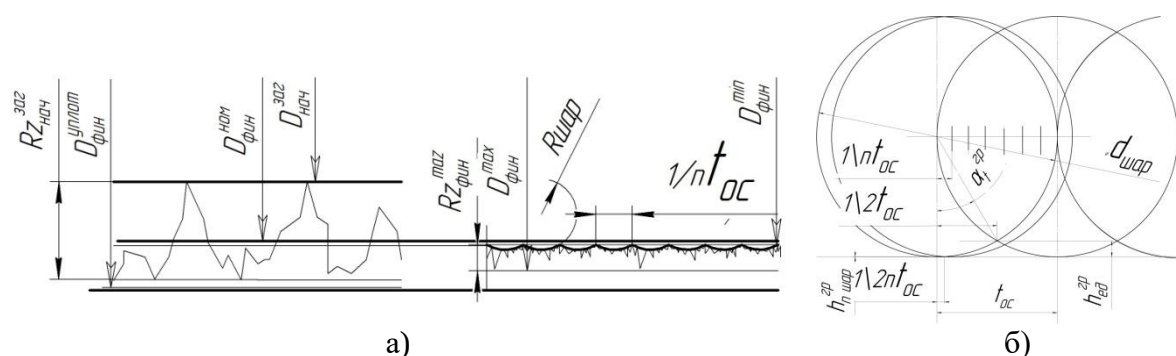


Рисунок 4. Схема для расчета величины шероховатости:

- а) иллюстрация смятия неровностей шероховатости при раскатке; б) иллюстрация зависимости высоты гребня от размера шара и количества шариков в головке.

Из положений геометрии высота $h_{ед}^{сп}$ гребня винтового при перемещении одного инструмента-шара с шагом $t_{ос}$ определяется выражением вида:

$$h_{ед}^{сп} = R - \sqrt{R^2 - (0,5R)^2} = R(1 - \sqrt{1 - 0,5^2}). \quad (1)$$

Для схемы с применением количества n шариков в головке выражение (1) можно преобразовать и записать в общем виде как:

$$h_i^n = R \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}} \right), \quad (2)$$

где R – радиус шарика в головке раскатной;

h_i^n – высота гребня винтовой линии гребня при количестве n шариков;

t_n^y – осевой шаг винтовой линии гребня $t_n^y = \frac{R}{n}$ при количестве n шариков в головке.

Величиной упругих деформаций при раскатке можно пренебречь в силу очень малых значений возможного восстановления геометрии за счет упругости стали.

Из выражения (2) можно сделать вывод о возможности регулирования высоты неровностей поверхностей обрабатываемых отверстий, которыми определяется шероховатость при раскатке, за счет изменения числа одновременно воздействующих на поверхность шариков. Другим положительным эффектом является возможность регулирования структуры поверхностного слоя за счет раскатки прямым и обратным ходом с возможностью одинаковой или изменяемой величины осевой подачи. При этом поверхность приобретает ячеистую структуру, что позволяет предварительно определять условия смазки сопрягаемых поверхностей за счет удержания смазочных материалов с различными свойствами в ячейках с определяемыми заранее размерами.

Пример развертки структурированной ячеистой поверхности отверстия после раскатки приведен на рис. 5. Частота расположения ячеек поверхности, определяемая диагоналями ромба, зависит от числа шариков в раскаточной головке, а также от величины осевой подачи головки на оборот заготовки.

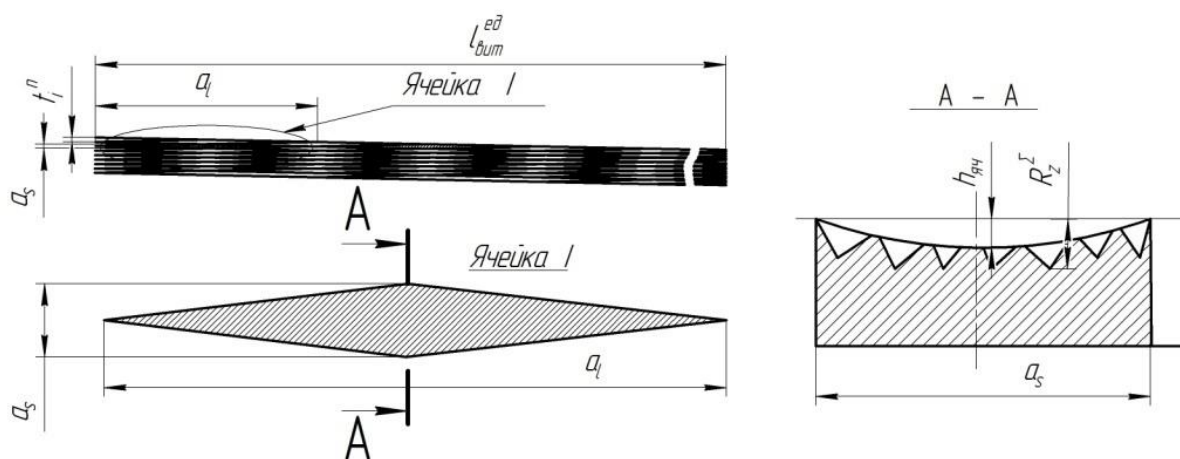


Рисунок 5. Эскиз примера формирования новых поверхностных свойств, в т. ч. ячеистой структуры внутренней поверхности отверстия фланца после раскатки шариковой головкой с множеством шариков

Размер ячеек определяется размерами диагоналей ромба. При этом большая диагональ a_l определяется из выражения $a_l = \frac{\pi D_{дет}}{n}$, где обозначение $D_{дет}$ указывает на диаметр детали, подверженный раскатке, а малая диагональ a_s определяется из выражения $a_s = \frac{t_{ос}}{n}$, где $t_{ос}$ – осевая подача шпинделя при раскатке. Знаменатель n в обоих выражениях указывает на количество шариков в раскатной головке.

Можно указать еще один важный аспект при раскатке отверстия, который оказывает влияние на эксплуатационные свойства материала. Это создание эффекта наклепа, или - нагартовки поверхностного слоя, который приобретает при деформационном воздействии шариков головки на обрабатываемую поверхность. Очевидно, что на параметры наклепа поверхностного слоя влияет некоторое множество факторов, в число которых можно включить первоначальную структуру материала, температурное сопровождение процесса раскатки, величину припуска и др.

Динамика процесса создания наклепа заслуживает отдельного рассмотрения в плане силового взаимодействия шариков с поверхностью детали, поскольку применение шариков различных диаметров и осуществление процесса с разными возможными величинами осевой подачи при оставлении под раскатку припуска различного размера и различной первичной шероховатости могут существенно менять конечный результат. Так же отдельного рассмотрения требует и вопрос формирования необходимых параметров ячеистой структуры поверхности в плане повышения смазочной способности в сборе механизмов, учитывающий выбор типа смазки, материала основных сопрягаемых деталей, а также условий эксплуатации.

4. Заключение

Выполненные в работе исследования процесса раскатки сдвоенных отверстий для фланца карданного вала тепловозов серии ТГМ с окончательным размером $\varnothing 105H7^{(+0,035)}$ мм и шероховатостью внутренней поверхности Ra 1,6 мкм позволили достичь положительных результатов в отношении поставленной цели и решении ряда частных задач.

Получено решение следующих задач:

1. Выполнен анализ технологического воздействия инструментальной раскатной головки, инструментальная часть которой выполнена с включением в состав 7 шариков $\varnothing 20$ мм, на обрабатываемую поверхность детали. При этом исследованию подвержен частный вопрос обеспечения размерной точности отверстия $\varnothing 105^{(+0,035)}$ мм с допуском по классу H7 и шероховатостью поверхности Ra 1,6 мкм;

2. Установлена формальная связь между параметрами инструмента, выраженная в зависимости степени геометрической точности обрабатываемого размера и параметров шероховатости обрабатываемой поверхности от определяющих параметров головки раскаточной, включая диаметр и количество шариков в головке;

3. Разработана конструкция экспериментальной раскатной головки для раскатки сдвоенного отверстия $\varnothing 105^{(+0,035)}$ на горизонтально-расточном станке мод. 2620;

4. Изготовлена экспериментальная раскатная головка с применением шариков диаметром 20мм в количестве 7 шт. с целью практической проверки результатов аналитических исследований и выводов относительно формирования конечных размеров с заданной точностью и достижения требуемого уровня шероховатости поверхности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Смелянский, В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
3. Антонюк, В. Е. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. Учебное пособие. / В. Е. Антонюк, М. М. Канне, В. Е. Старжинский и др. – Мн.: УП «Технопринт». 2003. – 766 с.
4. Бабичев, А. М. Справочник инженера-технолога в машиностроении//Справочник, Машиностроение, Изд. 2006. -544с.
5. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

Поступила в редколлегию 09.02.2024 г.

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

¹Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц., ²А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.,³В. А. Михайлов, канд. техн. наук, ¹Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц.¹Донецкий институт ГПС МЧС России, г. Донецк, ДНР, Россия²Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Россия³Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Воркута, Республика Коми, Россия

Тел.: +7 949 3821135; E-mail: dmitry.michailov@mail.ru

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИНЖИНИРИНГА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУРЫ ВЕРТОЛЕТНОГО ГТД

В статье представлены некоторые особенности комплексного инжиниринга эксплуатационных и технологических параметров вертолетного газотурбинного двигателя при обеспечении функционально-ориентированных свойств его структуры. Комплексный инжиниринг позволяет устанавливать закономерности параметров двигателя на различных жизненных циклах системы «эксплуатация-обеспечение свойств-реализация технологического обеспечения» по его элементам и по всей структуре в целом. А также он обеспечивает решение вопросов обеспечения функционально-ориентированных свойств для сложной иерархической структуры ГТД, работающей в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий потока среды.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, структура, параметры, комплексный инжиниринг, функционально-ориентированные свойства.

D. A. Mikhaylov, A. N. Mikhaylov, V. A. Mikhaylov, E. A. Sheiko

SOME FEATURES OF COMPLEX ENGINEERING OF PARAMETERS OF ELEMENTS AND STRUCTURE OF A HELICOPTER GAS TURBINE ENGINE

The article presents some features of complex engineering of operational and technological parameters of a helicopter gas turbine engine while ensuring the functionally oriented properties of its structure. Integrated engineering makes it possible to establish patterns of engine parameters in various life cycles of the system "operation-providing properties-implementation of technological support" for its elements and for the entire structure as a whole. It also provides a solution to the issues of ensuring function-oriented properties for the complex hierarchical structure of a gas turbine engine operating under conditions of uneven operational influences of the medium flow.

Key words: gas turbine engine, structure, parameters, integrated engineering, function-oriented properties.

1. Введение

Комплексный анализ структуры существующих отечественных [1, 2, 3, 4] и зарубежных [5, 6] авиационных двигателей, которые представлены в современной литературе множеством вариантов конструкций, позволяет классифицировать вертолетные газотурбинные двигатели (ГТД) в зависимости от следующих особенностей [6]:

1. В зависимости от структуры компоновки подсистем двигателя и их кинематических связей с несущим винтом.

2. В зависимости от схем структурных вариантов элементов турбокомпрессора и свободной турбины.

3. В зависимости от схем структуры компоновки элементов (лопаток) в компрессоре, турбине, свободной турбине и других элементов вертолетного ГТД, более низкого иерархического уровня элементов.

Можно отметить, что возможны и другие варианты классификации вертолетных ГТД, которые приведены в различных литературных источниках [7, 8].

Проведенные исследования существующих вариантов схем, известных и перспективных вариантов классификации вертолетных ГТД позволил установить, что их элементную базу можно представлять или классифицировать, как иерархическую структуру R -уровней [9]. При этом выполненный анализ особенностей ее эксплуатации показал, что на эту иерархическую структуру действуют неравномерные и не одинаковые эксплуатационные воздействия R -родов [9], которые приводят к неравномерному и не одинаковому износу элементов структуры. Эти особенности не позволяют производить дальнейшее повышение эксплуатационных свойств (ЭС) (например, ресурс, назначенный ресурс, межремонтный ресурс, долговечность) элементов структуры – как единого целого системы двигателя, при этом обеспечивать его высокие технико-экономические показатели (ТЭП). А также следует отметить, что в процессе проектирования и изготовления элементов структуры вертолетного ГТД не учитываются особенности изменения действий по элементам структуры ГТД эксплуатационных воздействий R -родов (например, изменений абразивно-эрозионных воздействий по ступеням лопаток компрессора), что приводит к неполному и не одинаковому использованию полного эксплуатационного потенциала элементов структуры двигателя. Все это значительно снижает ТЭП вертолетного ГТД на его основных этапах жизненного цикла (ЖЦ) структуры системы «эксплуатация-формирование физико-механических свойств (ФМС)-реализация технологического обеспечения (ТО)».

Для решения вопросов повышения ТЭП и ЭС сложной иерархической структуры вертолетного ГТД R -уровней, работающей в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий R -родов, предложено выполнять для отдельных элементов функционально-ориентированные свойства (ФОС) [10], а для структуры - обеспечивать ФОС R -классов [9] по уровням структуры на базе функционально-ориентированного подхода (ФОПО). При этом этот подход предусматривает решение вопросов обеспечения ФОС элементов структуры по их уровням с учетом особенностей (закономерностей) параметров ЭС, ФОС и ТО на трех этапах ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО». Причем эти вопросы могут быть решены совместно на базе комплексного инжиниринга параметров, который комплексно устанавливает закономерности параметров ЭС, ФОС и ТО по элементам иерархической структуры двигателя с учетом трех основных этапов ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО». В этом случае, данный процесс выполняется на базе двух условий обеспечения ЭС элементов и структуры ГТД: 1-е условие - общее для всей структуры, устанавливающее особенности параметров ЭС всего двигателя; 2-е условие - структурное, устанавливающее закономерности распределения ЭС по элементам структуры.

Можно отметить, что эти вопросы комплексного инжиниринга, связанные с установлением закономерностей параметров ЭС, ФОС и ТО для элементов структуры вертолетного ГТД в зависимости от этапов ЖЦ системы требуют дальнейшего развития и пояснения.

Целью данной работы является создание механизмов и системы установления и обеспечения необходимых закономерностей параметров ЭС, ФОС и ТО по структуре элементов вертолетного ГТД в зависимости от этапов ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО», ориентированный на комплексное управление и обеспечение высоких ТЭП и ЭС структуры авиационного двигателя.

В соответствии с поставленной целью в данной работе предусматривается решение следующих основных задач: исследовать основные особенности структуры и эксплуатации вертолетного ГТД; выполнить анализ особенностей определения и обеспе-

чения параметров ЭС, ФОС и ТО по элементам и структуре двигателя; разработать механизм процесса комплексного инжиниринга параметров вертолетного ГТД; предложить схему состава комплексного инжиниринга параметров системы; установить особенности реализации комплексного инжиниринга параметров структуры ГТД.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Общие особенности комплексного инжиниринга параметров

Выполненные исследования позволили установить, что главной особенностью вертолетного ГТД является то, что он имеет сложную структуру элементов R -уровней, и в процессе его эксплуатации на всю его систему, подсистемы, группы деталей и другие элементы действуют неравномерные эксплуатационные воздействия R -родов [11, 12]. В этих сложных условиях, вертолетному ГТД необходимо обеспечить требуемые ЭС структуры (например, назначенный ресурс) и реализовать высокие ее ТЭП эксплуатации, выполнить формирование ФОС и реализовать ТО, а также требуется создать возможность управления параметрами ЭС с учетом основных этапов ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО». Эти вопросы решаются в данной работе на основе комплексного инжиниринга параметров ЭС, ФОС и ТО структуры элементов вертолетного ГТД.

Комплексный инжиниринг параметров ЭС, ФОС и ТО структуры вертолетного ГТД, работающего в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий R -родов, это процесс комплексного определения и/или обеспечения и/или управления параметрами на этапах ЖЦ системы «эксплуатации-формирование ФОС-реализация ТО» на основе установленных закономерностей и связей этих параметров между элементами структуры, который ориентирован на обеспечение высоких ТЭП и ЭС авиационного двигателя.

Можно отметить, что тот процесс может быть обеспечен на базе двух условий совместного формирования ЭС, ФОС и ТО, а также разработанного способа их реализации:

- 1-е условие (общее условие для всего ГТД) - обеспечение ЭС для всего ГТД: заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие ЭС, выполняемые для всей системы или для всего ГТД;

- 2-е условие (структурное условие) – обеспечение ЭС элементов структуры на основе определенных закономерностей (связей) формирования ФОС по структуре ГТД, а именно: равные, кратные, функционально-зависимые (ФЗ) или другие ЭС.

А также данный процесс может выполняться только на базе комплексного определения и/или обеспечения и/или управления параметрами, как по структуре, так и по основным этапам ЖЦ вертолетного ГТД, а именно по этапам его эксплуатации, формирования ФОС и реализации ТО. Его можно рассматривать – как инжиниринговую задачу, связанную с нахождением параметров по этапам ЖЦ системы ГТД, а управление параметрами ЭС, ФОС и ТО на базе разработанного способа и двух условий их выполнения [10, 11].

Инжиниринг параметров свойств технической системы устанавливает, закономерности обеспечения параметров ее свойств между этапами жизненного цикла, например, между этапом ее эксплуатации (интенсивность эрозионного износа) и этапом формирования ФМС (параметры состава материала), которые необходимы для управления этими параметрами и обеспечения необходимых ТЭП данной технической системы. Для вертолетного ГТД этот процесс следует рассматривать по трем этапам жизненного цикла элемента, а именно «эксплуатация-формирование ФОС (ФМС)-

реализация ТО». При этом следует иметь ввиду, что вертолетный ГТД состоит из множества элементов, представляющих собой иерархическую структуру R -уровней. А также при обеспечении ФОС вертолетного ГТД этот процесс должен выполняться на базе ФОПО, то есть с использованием группы особых принципов ориентации [10]. Поэтому, в этом случае, этот инжиниринг параметров нужно рассматривать комплексно, а именно с использованием трех слоев проектирования (рисунок 1):

- 1-й слой – элементы структуры вертолетного ГТД R -уровней;
- 2-й слой – группа особых принципов ориентации параметров ФОПО с общим их количеством (мощностью) s ;
- 3-й слой – этапы ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО».



Рисунок 1. Особенности определения и обеспечения параметров в процессе комплексного инжиниринга параметров ЭС, ФОС и ТО

В этом случае, связи между этими слоями проектирования должны выполняться итерационно-рекуррентные. Здесь, данный процесс реализуется, сначала для 1-го элемента структуры ГТД, затем для 2-го элемента, ..., далее для i -го элемента, ..., потом для n -го элемента. Процесс реализации ФОС заканчивается тогда, когда все параметры ЭС, ФОС и ТО структурных элементов ГТД будут определены и обеспечены с учетом всех принципов ФОПО и этапов ЖЦ вертолетного ГТД. Еще можно отметить, что процесс определения и обеспечения параметров ЭС, ФОС и ТО структуры должен производиться с учетом разработанного способа распределения параметров по структуре двигателя [11].

Комплексный инжиниринг параметров элементов и структуры вертолетного ГТД с ФОС, работающего в условиях действия неравномерных ЭВ R -родов, предназначен для системного формирова-

рования эксплуатационных, функционально-ориентированных (ФМС) и технологических параметров свойств элементов для всей структуры авиационного двигателя. При этом эти параметры свойств элементов структуры обеспечиваются на основе установленных связей и закономерностей изменения их по этапам ЖЦ системы проектирования «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО», которые определяются на базе двух условий обеспечения ЭС всего двигателя и их распределения по структуре элементов. В этом случае, обеспечивается возможность управления этими параметрами для всей структуры для обеспечения высоких ТЭП вертолетного ГТД.

Комплексный инжиниринг параметров элементов и структуры вертолетного ГТД с ФОС выполняется на базе разработанной структурной модели общего подхода комплексного обеспечения параметров структуры вертолетного ГТД, а также следующих положений:

- группы особых принципов ориентации ЭС, ФОС и ТО в ФОПО [10];
- двух условий обеспечения ЭС всего двигателя и их распределения по структуре элементов вертолетного ГТД [11]
- разработанного способа распределения параметров ЭС, ФОС и ТО по структуре элементов ГТД [11];

- установленных связей между параметрами ЭС, ФОС и ТО в системе ЖЦ «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО» [11];

- баз данных параметров вертолетного ГТД системы «эксплуатация-формирование ФОС (ФМС)-реализация ТО» [11].

Комплексный инжиниринг параметров ЭС, ФОС и ТО вертолетного ГТД направлен на определение, обеспечение и управление параметрами, как отдельных элементов его структуры на этапах ЖЦ «эксплуатация - формирование ФОС – реализация ТО», так и всей структуры в целом.

На рисунке 2 представлены характеристики комплексного инжиниринга параметров ЭС, ФОС и ТО элементов и структуры вертолетного ГТД. Эти характеристики структурируются по следующим параметрам:

- условия применения;
- определение и формирование ЭС, ФОС и ТО на базе ФОПО;
- условия обеспечения ЭС;
- комплексный процесс определения и обеспечения параметров;
- структура комплексного инжиниринга;
- методика формирования параметров.

Можно отметить, что комплексный инжиниринг параметров ЭС, ФОС и ТО элементов и структуры вертолетного ГТД реализуется в том случае, когда имеются следующие условия применения:

- наличие сложной структуры R-уровней;
- наличие неравномерных разрушений структуры R-родов.

При этом процесс определения и формирования параметров ЭС, ФОС и ТО выполняется на базе ФОПО [10]. В этом случае, они обеспечиваются с использованием группы особых принципов ориентации ЭС, ФОС и ТО.

В данной работе, комплексный инжиниринг параметров ЭС, ФОС и ТО выполняется на базе двух условий обеспечения ЭС вертолетного ГТД, а именно общего условия для всего двигателя и структурного условия, устанавливающего закономерности распределения свойств между элементами структуры ГТД.

Следует отметить, что комплексный процесс определения и обеспечения параметров ЭС, ФОС и ТО выполняется следующих составляющих:

- по этапам ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО»;
- по каждому элементу и всей структуре ГТД;
- группы особых принципов ориентации параметров ЭС, ФОС и ТО.

Комплексный инжиниринг параметров имеет следующий состав (рисунок 3):

- инжиниринг параметров в бинарной подсистеме ЖЦ «эксплуатация-формирование ФОС»;
- инжиниринг параметров в бинарной подсистеме ЖЦ «ФОС-реализация ТО»;
- инжиниринг параметров в бинарной подсистеме ЖЦ «ТО-обеспечение новых ЭС».

В целом, последовательность формирования параметров ЭС, ФОС и ТО структуры вертолетного ГТД имеет следующие особенности:

1. Определение начальных данных и задание вариантов условий (два условия) обеспечения ЭС вертолетного ГТД.

2. Установление комплексных связей параметров ЭС, ФОС и ТО по этапам ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО».

3. Создание базы данных параметров бинарной системы «эксплуатация-ФОС».

4. Создание базы данных параметров бинарной системы «ФОС-ТО».

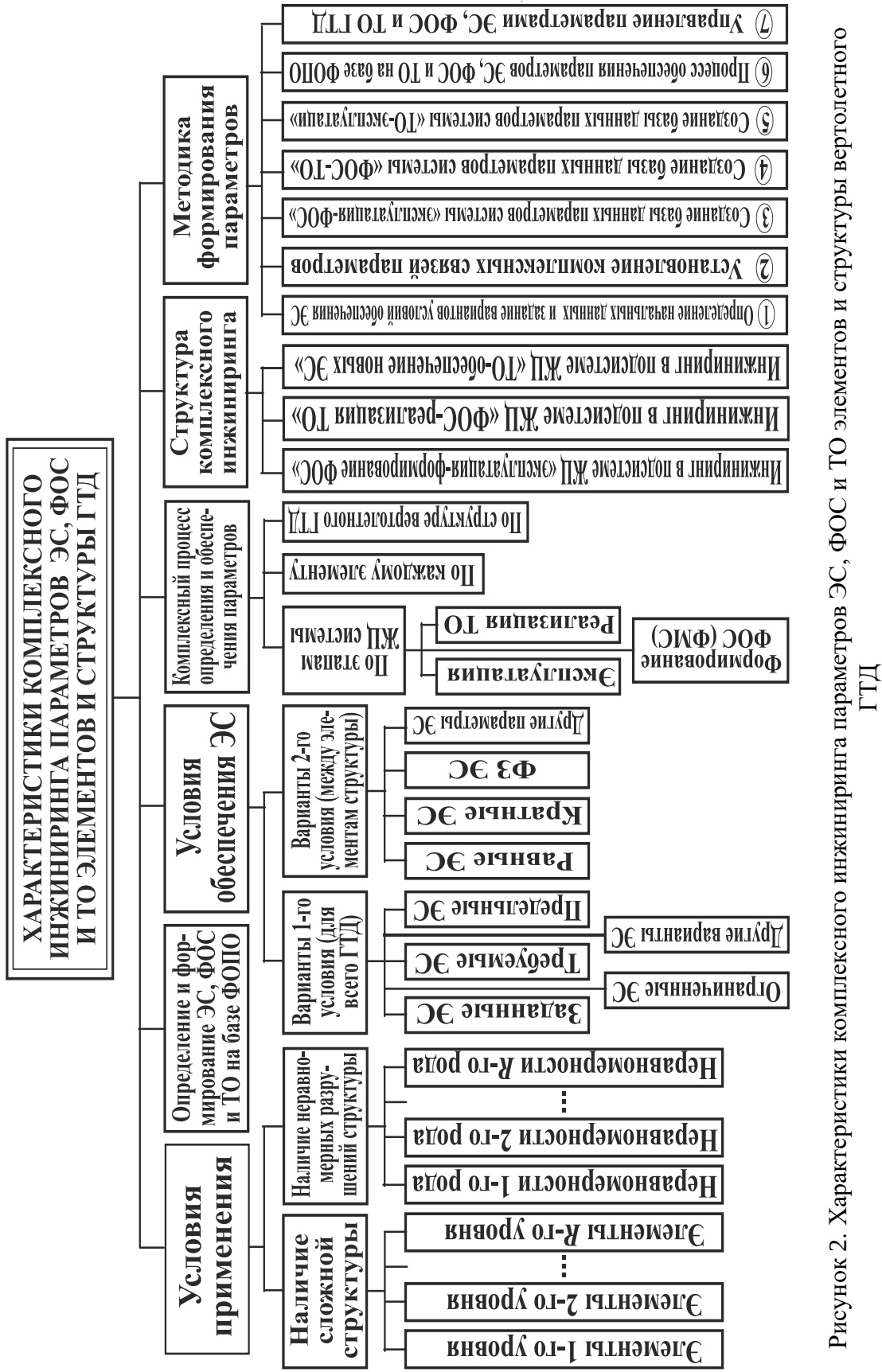


Рисунок 2. Характеристики комплексного инжиниринга параметров ЭС, ФОС и ТО элементов и структуры вертолетного ГТД

5. Создание базы данных параметров бинарной системы «ТО-эксплуатация».

6. Процесс обеспечения параметров ЭС, ФОС и ТО на базе ФОПО.

7. Управление параметрами ЭС, ФОС и ТО вертолетного ГТД.

Процесс определения, обеспечения и управления параметрами ЭС, ФОС и ТО выполняется на базе структурной модели [11] общего подхода комплексного обеспечения параметров ЭС, ФОС и ТО. Рассмотрим более детально этот вопрос.

2. Состав элементов комплексного инжиниринга параметров структуры вертолетного ГТД

Можно отметить, что комплексный инжиниринг параметров ЭС, ФОС и ТО выполняется на базе структурной модели общего подхода, который структурируется из бинарных элементов системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО». В этом случае, элементы модели имеют следующий состав этапов ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО» (рисунок 3):

- бинарные элементы подсистемы «эксплуатация-формирование ФОС» для 1-го шага инжиниринга общей системы;
- бинарные элементы подсистемы «формирование ФОС-реализация ТО» для 2-го шага инжиниринга общей системы;
- бинарные элементы подсистемы «реализация ТО-обеспечение ЭС» для 3-го шага инжиниринга общей системы.

На рисунке 3 представлены бинарные элементы комплексного инжиниринга параметров ЭС, ФОС и ТО: 1-й шаг – инжиниринг в подсистеме «эксплуатация-формирование ФОС»; 2-й шаг – инжиниринг в подсистеме «формирование ФОС-реализация ТО»; 3-й шаг – инжиниринг в подсистеме «реализация ТО-обеспечение ЭС». Здесь, связи бинарных элементов позволяют последовательно устанавливать закономерности параметров двойных элементов, а именно:

- закономерности связей эксплуатационных параметров и ФОС (ФМС) для каждого элемента структуры (простая двойная подсистема);
- закономерности связей ФОС (ФМС) и технологических параметров для каждого элемента структуры (простая двойная подсистема);
- закономерности связей технологических и эксплуатационных параметров для каждого элемента структуры (простая двойная подсистема).

Можно отметить, что на рисунке 3 показаны структурные составляющие трех этапов ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО»:

$$\left. \begin{aligned} Str_1(F, B) &= \{F, B\}, \\ Str_2(C, D) &= \{C, D\}, \\ Str_3(T, E) &= \{T, E\}; \end{aligned} \right\}$$

где $Str_1(F, B)$, $Str_2(C, D)$ и $Str_3(T, E)$ - структура действующих эксплуатационных функций, ФОС и ТО, соответственно;

F , C и T – подмножества элементов соответствующих структур;

B , D и E – подмножества отношений на подмножествах F , C и T , соответственно.

А также структуру вертолетного ГТД определяется следующим выражением:

$$Str_4(X, A) = \{X, A\}, \quad (1)$$

где $Str_4(X, A)$ - структура элементов вертолетного ГТД;

X – подмножество элементов структуры;

A – подмножество отношений на подмножестве X (множество связей).

При этом отметим, что закономерности параметров ЭС, ФОС и ТО должны последовательно определяться для всего множества элементов 1, 2, 3, ..., i , ..., n структуры вертолетного ГТД для всех элементов R -уровней, на базе операции алгоритма $i = i + 1$. На рисунке 3 стрелка показывает переходы от одной бинарной подсистемы инжиниринга к другой, которые выполняются на основе трех шагов процесса проектирования. В этом случае, этот процесс производится с использованием всех принципов с полной группы особых принципов ориентации ЭС, ФОС и ТО, которые определяются системой ЖЦ «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО».

3. Связи и формирование баз данных параметров

Следует отметить, что в процессе выполнения комплексного инжиниринга на каждом из шагов процесса, главным является установление связей между параметрами элементов бинарной подсистемы:

- на 1-м шаге выполняется установление закономерностей параметров между элементами системы 1 и 2 (рисунок 3), а именно между элементами ЖЦ бинарной системы «эксплуатация-формирование ФОС» для i -го элемента структуры ГТД

$$\Phi MC_i = \varphi_{12}(\mathcal{E}C_i); \quad (2)$$

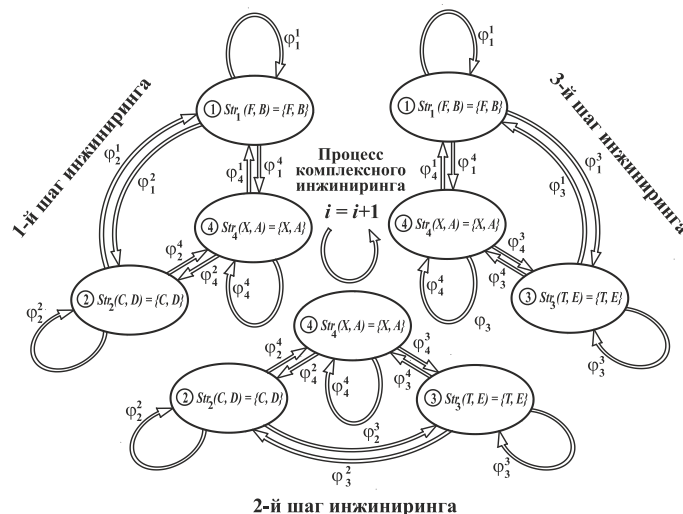


Рисунок 3. Состав элементов комплексного инжиниринга параметров ЭС, ФОС и ТО: 1-й шаг – инжиниринг в бинарной подсистеме «эксплуатация-формирование ФОС»; 2-й шаг – инжиниринг в бинарной подсистеме «формирование ФОС-реализация ТО»; 3-й шаг – инжиниринг в бинарной подсистеме «реализация ТО-управление ЭС»

- на 2-м шаге выполняется установление закономерностей параметров между элементами системы 2 и 3 (рисунок 3), а именно между элементами ЖЦ бинарной системы «формирование ФОС-реализация ТО» для i -го элемента структуры ГТД

$$TO_i = \varphi_{23}(ФМС_i); \quad (3)$$

- на 3-м шаге выполняется установление закономерностей параметров между элементами системы 2 и 3 (рисунок 3), а именно между элементами ЖЦ бинарной системы «формирование ФОС-реализация ТО» для i -го элемента структуры ГТД

$$TO_i = \varphi_{31}(ЭС_i), \quad (4)$$

где $\varphi_{g j}$ - функция перехода, зависимость параметров g -го элемента системы от параметров j -го элемента системы.

Например, для первой зависимости, на 1-м шаге при обеспечении ФОС 1-го элемента структуры ГТД это может быть зависимость ФМС его материала на этапе обеспечения свойств от интенсивности его износа на этапе эксплуатации. На 2-м шаге – зависимость интенсивности выполнения технологических параметров от параметров ФМС (ФОС). На 3-м шаге – зависимость интенсивности износа элемента структуры от параметров интенсивности реализации технологических параметров в замкнутой системе структурной модели общего подхода [11, 12]. На основании этого, можно характеризовать эти шаги процесса следующим образом:

- 1-й шаг – инжиниринг параметров по свойствам (ФМС (ФОС));
- 2-й шаг – технологический инжиниринг параметров (ТО);
- 3-й шаг – инжиниринг параметров по эксплуатационным свойствам (ЭС).

Можно отметить, что эти три шага процесса представляют собой один цикл комплексного процесса проектирования и обеспечения ЭС, ФОС и ТО структуры ГТД, при этом решение вопросов их обеспечения может реализовываться на базе нескольких циклов процесса. Поэтому этот процесс можно организовывать - многоциклическим, при этом обеспечивается возможность улучшения и управления эксплуатационными параметрами структуры ГТД по ЭС. А также данный процесс можно выполнять в обратном порядке, обеспечивая при этом, например, предельные или ограниченные ЭС структуры вертолетного ГТД. Кроме того, процесс инжиниринга параметров ЭС, ФОС и ТО структуры вертолетного ГТД должен выполняться с использованием особенностей определения и обеспечения параметров в процессе комплексного инжиниринга, представленных на рисунке 3, а именно с учетом слоев проектирования:

- по элементам структуры R -уровней;
- на базе группы особых принципов ориентации параметров ФОПО [10];
- на основе трех этапов ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО».

Разработанная структурная модель общего подхода обеспечения ФОС структуры вертолетного ГТД позволяет решать вопросы определения, обеспечения и управления параметрами ЭС, ФОС и ТО на базе комплексного инжиниринга параметров с возможностью их реализации по структуре, по отдельным принципам группы особых принципов их ориентации и по этапам ЖЦ системы. Это обеспечивает возможность устанавливать закономерности параметров ЭС, ФОС и ТО по группе особых принципов ориентации параметров, по этапам ЖЦ системы и по структуре элементов ГТД в

зависимости от вариантов двух условий обеспечения ЭС по структуре вертолетного ГТД. При этом для установления параметров ЭС, ФОС и ТО структуры вертолетного ГТД необходима методика и алгоритм их определения.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе представлены механизм и система установления и обеспечения необходимых закономерностей параметров ЭС, ФОС и ТО по структуре элементов вертолетного ГТД в зависимости от этапов ЖЦ системы «эксплуатация-формирование ФОС-реализация ТО», ориентированный на комплексное управление и обеспечение высоких ТЭП и ЭС структуры авиационного двигателя.

В работе исследованы основные особенности структуры и эксплуатации вертолетного ГТД, при этом установлено, что вертолетный ГТД можно моделировать как иерархическую структуру R -уровней, в которой действуют неравномерности эксплуатационных воздействий R -родов. При этом выполнен анализ особенностей определения и обеспечения параметров ЭС, ФОС и ТО по элементам и структуре двигателя. Для установления закономерностей параметров ЭС, ФОС и ТО структуры ГТД разработан механизм процесса комплексного инжиниринга параметров вертолетного ГТД. А также в работе предложена схема состава комплексного инжиниринга параметров системы и установлены особенности реализации комплексного инжиниринга параметров структуры вертолетного ГТД. Решение данных вопросов позволяет системно формировать эксплуатационные, функционально-ориентированные и технологические параметры свойств элементов для всей структуры авиационного двигателя. Разработанный процесс комплексного определения и/или обеспечения и/или управления параметрами на этапах ЖЦ системы «эксплуатации-формирование ФОС-реализация ТО», выполняемый на основе установленных закономерностей и связей параметров между элементами структуры, ориентирован на комплексное обеспечение высоких ТЭП и ЭС вертолетного ГТД.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гарькавый, А. А. Двигатели летательных аппаратов / А. А. Гарькавый, А. В. Чайковский, С. И. Ловинский. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Зрелов, В. А. Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы (Часть 1): Учебное пособие / В. А. Зрелов. – Самара: Самарский гос. аэрокосмический университет, 2002. – Ч. 1. – 210 с.
3. Скубачевский, Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели: Учебник для студентов авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.
4. Иноземцев, А. А. Газотурбинные двигатели / А. А. Иноземцев, В. Л. Сандрацкий. – Пермь: ОАО «Авиадвигатель», 2006. – 1204 с.
5. Иностранные авиационные двигатели. – М.: ЦИАМ, 1992. – 286 с.
6. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
7. Авиационные двигатели / Под ред. И. Г. Шустова. – М.: ООО ИД «АЭРО-СФЕРА», 2007. – 328 с.
8. Богуслаев, В. А. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. I. Основы технологии. / В.А. Богуслаев [и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 518 с.
9. Михайлов, Д. А. Основные особенности и условия обеспечения эксплуатационных и функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя по его

структуре / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2022. - Вып. 2 (77). - С. 35 – 49.

10. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с

11. Михайлов, А. Н. Технологический инжиниринг в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток ГТД / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, А. А. Колодяжный, Е. А. Шейко. // Научный симпозиум технологов – машиностроителей: Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий. – Ростов-на-Дону: ДГТУ (Дивноморск), 2021. – С. 99-106.

12. Интегрированный технологический инжиниринг параметров в процессе синтеза функционально-ориентированных свойств структуры лопаток компрессора газотурбинного двигателя / Д. А. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2022. - Вып. 1 (76). - С. 53 - 65.

Поступила в редколлегию 06.02.2024 г.

А. А. Муховатый

(ФГБОУ ВО РФ «ЛГУ имени В. Даля», г. Луганск, ЛНР, Россия),

Тел.: +7(959) 140-14-66; e-mail: mukhovatiy@mail.ru

СИНТЕЗ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПО ПРИВЕДЕННОЙ КРИВИЗНЕ, ПРЯМОПРОПОРЦИОНАЛЬНО СИНУСУ УГЛА ПРОФИЛЯ

В статье приведена математическая модель синтеза исходного контура зубьев зубчатых передач по критерию приведенной кривизны, прямопропорциональной синусу угла профиля; определены геометрические параметры и синтезирован исходный контур зубьев передачи с высокими значениями критериев работоспособности. Проведена оценка по таким критериям работоспособности: потери мощности в зацеплении, толщины масляного слоя, удельной работы сил трения, заедания.

Ключевые слова: исходный контур, зубчатая передача, дифференциальное уравнение, работоспособность, анализ, нагрузочная способность, привод.

A. A. Mukhovaty

SYNTHESIS OF GEARS ACCORDING TO REDUCED CURVATURE DIRECTLY PROPORTIONAL TO THE SINE OF THE PROFILE ANGLE

The article presents a mathematical model for the synthesis of the initial contour of gear teeth according to the criterion of reduced curvature, directly proportional to the sine of the profile angle; geometric parameters were determined and the initial contour of gear teeth with high values of performance criteria was synthesized. An assessment was carried out based on the following performance criteria: power loss in engagement, oil layer thickness, specific work of friction forces, and jamming.

Keywords: original circuit, gear transmission, differential equation, performance, analysis, load capacity, drive.

1. Введение

Работоспособность и экономические показатели современных машин в различных отраслях в существенной мере зависят от показателей работоспособности зубчатых приводов. Создание зубчатых передач с высокими критериями работоспособности обеспечивает совершенствование не только приводов, но и машин в целом, что является актуальным для современного машиностроения. Совершенствование зубчатых приводов возможно за счет разработки зубчатых передач по критерию приведенной кривизны.

Приведенная кривизна рабочих поверхностей зубьев зубчатых передач на параллельных осях является одним из важных геометро-кинематических критериев зацепления. В последние годы проводятся интенсивные исследования по созданию зубчатых передач с высокой нагрузочной способностью [1-7]. В этих исследованиях определяется геометрия зубьев передач с использованием исходных контуров, профили, которых очерчены различными кривыми: прямыми с увеличенным профильным углом [1], кривыми, синтезированными по заданной линии зацепления [2], синусоидами [3], окружностями [4, 5], кривыми, уравнения которых определяются, решением дифференциальных уравнений [6, 7]. В работе [8] проведены исследования по синтезу исходного контура с использованием постоянного значения критерия приведенной кривизны в поле зацепления для дозаполусной передачи.

Цель работы. Провести синтез исходного контура по критерию приведенной кривизны зубьев передач для случая, когда приведенная кривизна прямопропорциональна синусу угла профиля, определить параметры исходного контура зубьев передачи.

2. Математическая модель зубчатой передачи

Дифференциальное уравнение для определения геометрических параметров исходного контура по заданному значению приведенной кривизны в зацеплении зубчатых колес имеет вид [8]

$$\begin{aligned}\varsigma' &= \frac{\varsigma(1 - \sqrt{\chi_o \varsigma})}{f_1}; \\ \chi_o &= \frac{\bar{\chi}}{\sin \alpha_o},\end{aligned}\tag{1}$$

где $\bar{\chi}$ - заданная величина, которая показывает, какую часть приведенная кривизна рабочих поверхностей зубьев синтезируемой зубчатой передачи составляет от приведенной кривизны эвольвентной передачи. Величина $\bar{\chi}$ может иметь как постоянное, так и переменные значения в зависимости от f_1 ; (f_1 – координата профиля (рис. 1)); α_o – угол профиля эвольвентной передачи; $\alpha_o = 20^\circ$.

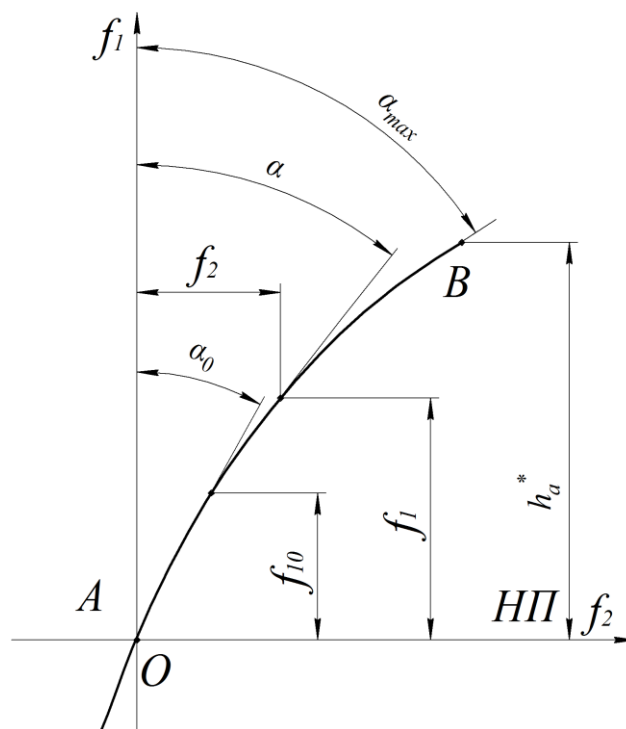


Рисунок 1. Профиль исходного контура (НП – начальная прямая)

Рассмотрим вариант, когда χ_o уменьшается с уменьшением профильного угла исходного контура, и

$$\chi_o = a_\chi \varsigma,\tag{2}$$

где a_χ - постоянная величина.

Уравнение (1) будет иметь вид:

$$\varsigma' = \frac{\varsigma(1 - \sqrt{a_\chi \varsigma})}{f_1}. \quad (3)$$

Решение этого уравнения запишем в виде:

$$c_2 f_1 = \frac{\varsigma}{1 - \sqrt{a_\chi \varsigma_o}} \quad (4)$$

При $f_1 = f_{10}$ и $\varsigma = \varsigma_o$ получаем:

$$c_2 = \left(\frac{\varsigma_o}{1 - \sqrt{a_\chi \varsigma_o}} \right) f_{10}. \quad (5)$$

Для значений $f_1 = f_{1max}$ и $\varsigma = \varsigma_{max}$ из (4) a_χ будет равно (рис. 2):

$$a_\chi = \left[\frac{\varsigma_o f_{1max} - \varsigma_{max} f_{10}}{\varsigma_{max} \varsigma_o (f_{1max} - f_{10})} \right]^2. \quad (6)$$

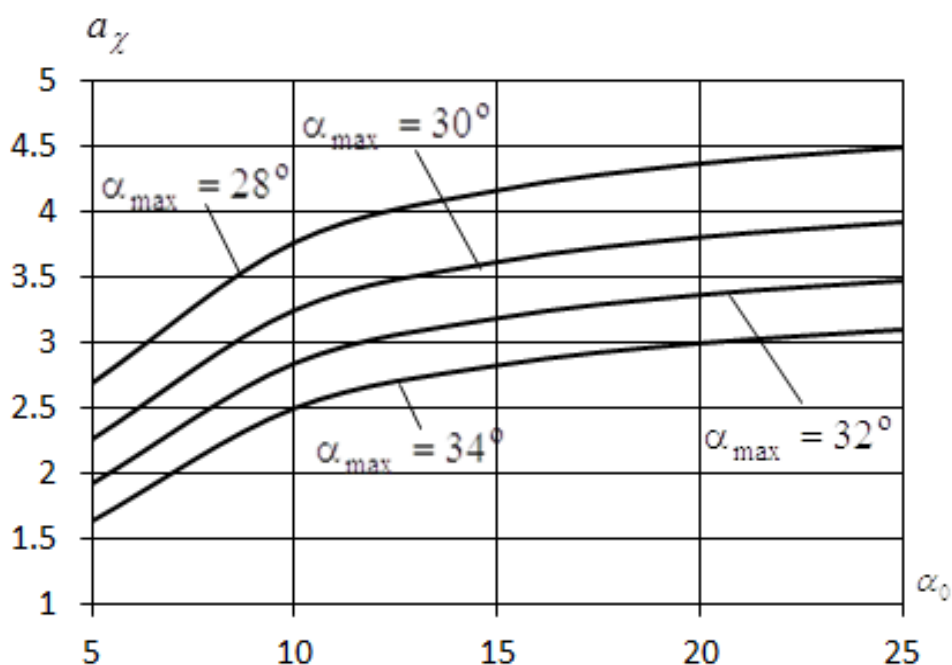


Рисунок 2. Графики зависимости a_χ от $f_{10}, \alpha_o, \alpha_{max}$ при $f_{1max} = 1$
 $f_{10} = 0,05$

3. Проектирование зубчатой передачи и исследование по критериям нагрузочной способности

Рассмотрим для примера случай, когда $f_{10} = 0,05$; $f_{1max} = 1$; $\alpha_0 = 20^\circ$; $\alpha_{max} = 30^\circ$. Для этих исходных данных по графику рисунка 2 находим $a_\chi = 3,8$. По методике [8] получаем:

$$\begin{aligned} f_2'' &= \frac{0,01949}{f_1^{1,652}}; \\ f_2' &= -0,02999 f_1^{-0,652} + 0,57547; \\ f_2 &= 0,8618 f_1^{0,348} + 0,57347 f_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует $\alpha_{max} = 28,61^\circ$, что на 4,6% меньше заданного $\alpha_{max} = 30^\circ$. Что показывает достаточную точность данных, получаемых с использованием функций (7). На рис. 3, 4 и в табл. 1 представлены значения параметров исходных контуров, профиль зуба и построенные объемные модели передач для передаточных чисел 3 и 4.

Таблица 1. Параметры исходных контуров при переменном значении χ_o

α_0	h_a^*	h_f^*	ρ^*	c^*	S_{a1}^*	S_{a2}^*	p^*	a^*	ε_λ
0°	1	1,17579	0,33731	0,17579	0,59224	0,59224	1,5708	0,83848	1,48

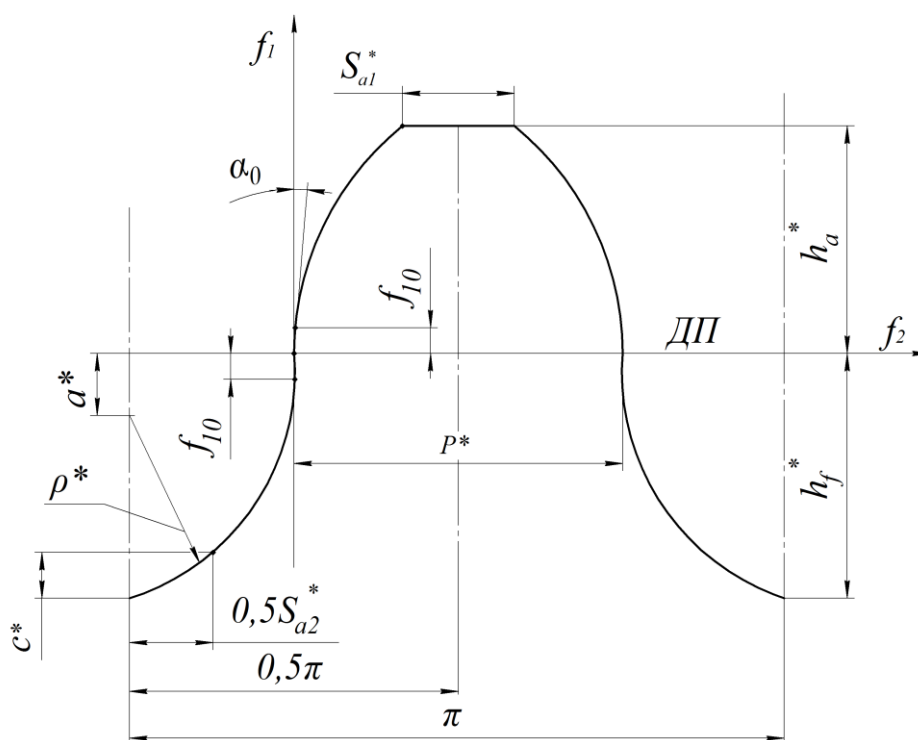


Рисунок 3. Исходный контур (ДП – делительная прямая)

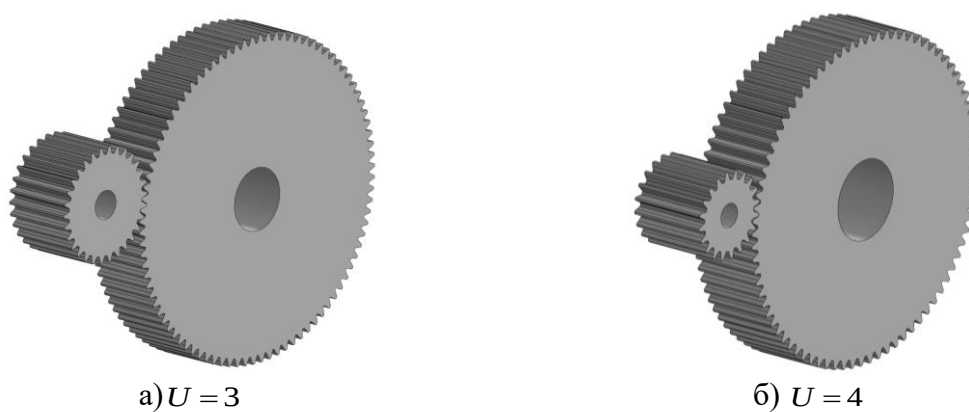


Рисунок 4. Дозаполюсные передачи с различными передаточными числами при $\alpha_0 = 20^\circ$

На рисунках 5,6 даны графики значений относительных критериев нагрузочной зубчатой передачи при передаточном числе 3 и 4.

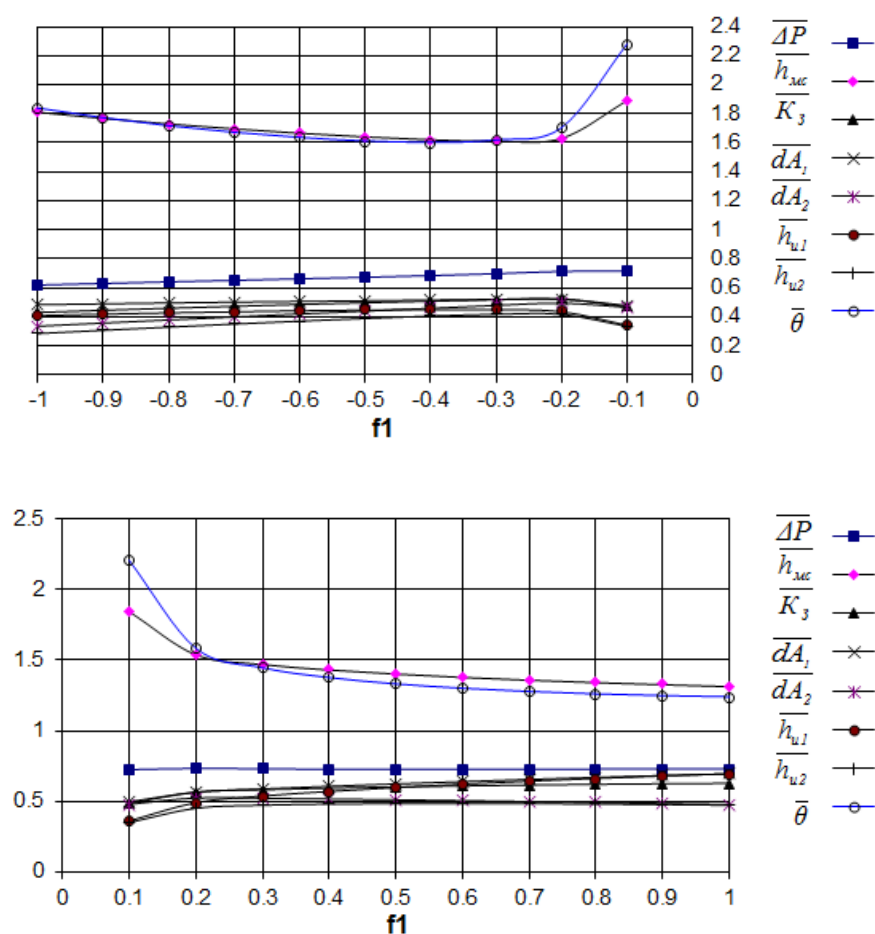


Рисунок 5. Графики значений относительных критериев нагрузочной способности дозаполюсной зубчатой передачи при $\alpha_0 = 20^\circ$ $U = 3$

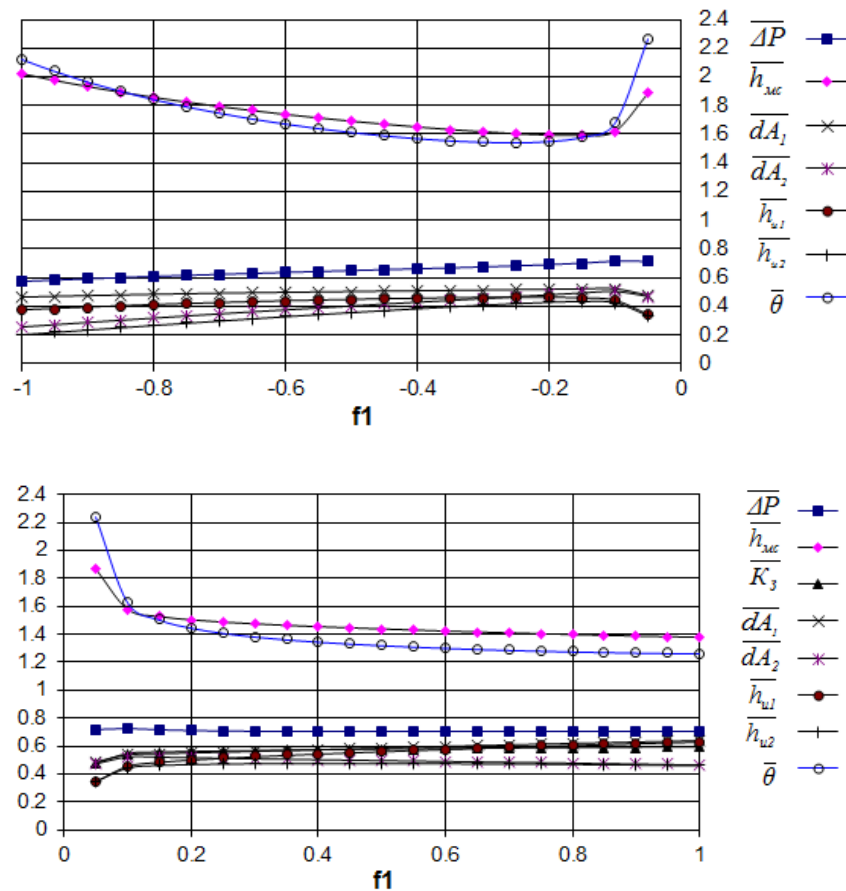


Рисунок 6. Графики значений относительных критериев нагрузочной способности дозаполюсной зубчатой передачи при $\alpha_0 = 20^\circ$ $U = 4$

Анализ данных графиков значений критериев нагрузочной способности на рисунках 5,6, показывает, что критерий $\overline{\Delta P}$ потерь мощности в зацеплении в 3 раза меньше; критерий $\overline{h_{mc}}$ толщины масляного слоя в 2,5 раза больше; критерий $\overline{K_3}$ заедания в 7,7 раз меньше; критерий $\overline{dA}$ удельной работы сил трения в 3 раза меньше; критерий $\overline{h_u}$ износа зубьев в 7,14 раза меньше; критерий $\overline{\theta}$ контактной прочности в 2,5 раза больше.

4. Заключение

1. Разработана математическая модель синтеза исходного контура зубьев зубчатых передач по критерию приведенной кривизны прямопропорциональной синусу угла профиля рабочих поверхностей.

2. Получены геометрические параметры исходного контура зубьев передачи по критерию приведенной кривизны прямопропорциональной синусу угла профиля рабочих поверхностей.

3. Дальнейшее использование полученных результатов связано с определением рациональных параметров исходного контура и проведением экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник / Под ред. Э. Б. Вулгакова. – М.: Машиностроение, 1981. – 374с.
2. Башански, М. Возможность использования неэвольвентного зацепления в коробках передач сельскохозяйственных машин/ Башански М, Токоли П., Ваня Ф., Кожух И.// Вісник НТУ «ХПІ». — Харків: НТУ «ХПІ». —2011.—№ 29.— С. 21-30.
3. Аникин, Ю. В. Синусоидальное зацепление / Аникин Ю. В. — Воронеж: изд-во ВНУ, 1975.—С. 56.
4. Шабанов, И. Р. О зубчатой передаче с конхоидальной линией зацепления/ Шабанов И. Р.//Надежность и качество зубчатых передач. НИИ информтяжмаш. 18-67-106. 1967.—С.1-8.
5. Шабанов, И. И. Зубчатая передача, состоящая из цилиндрических зубчатых колес с конхоидальной линией зацепления и ее элементы/ Шабанов И. И. //Труды УСХИ. Том XII, вып.16 1966.—С.20-28.
6. Шишов, В. П. Теоретические основы синтеза передач зацеплением: монография/ Шишов В. П., Носко П. Л., Филь П. В. —Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006.—408с.
7. Павлов, А. И. Современная теория зубчатых зацеплений. / Павлов А. И. – Харьков: ХНАДУ, 2005.- 100с.
8. Муховатый, А. А. Особенности синтеза передач на параллельных осях для оборудования механической обработки/ А. А. Муховатый // Вестник машиностроения. – М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2022. – № 1. – С. 35 – 38.

Поступила в редколлегию 30.01.2024 г.

УДК 621.45.038.7

Е. В. Овчинников, докт. техн. наук., **А. Ч. Свистун**, канд. физ.-мат. наук, доцент,
Е. В. Матук, канд. физ.-мат. наук, доцент, **В. Ч. Белаш**, магистр,
А. Е. Овчинников
(Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь)
Тел./Факс: +375 (152) 684108; E-mail: ovchin@grsu.by

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ПО БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В статье рассмотрены триботехнические характеристики электроискровых покрытий (ЭИЛ), сформированных по бесконтактной технологии. Данный технологический подход позволяет уменьшить дефектность формируемых ЭИЛ покрытий, а также получать антифрикционные слои из непроводящих материалов, в частности из оксидной керамики. Исследовали покрытия различной природы происхождения, полученные на титановых субстратах. Установлено, что формирование многокомпонентных и многофункциональных электроискровых покрытий при взаимодействии плазмы низковольтного разряда с порошковыми материалами позволяет получить защитные слои с высокими антифрикционными свойствами, обеспечивающими снижение значений коэффициента трения на 30-35% и интенсивности изнашивания в 1.5-2 раза по сравнению с исходным материалом VT1-0.

Ключевые слова: покрытие, плазма, морфология, трение, титан.

Y. V. Auchynnika, A. Ch. Svistun, E. V. Matuk, V. Ch. Belash, A. Y. Auchynnika

TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF ELECTROSPARK COATINGS FORMED USING NON-CONTACT TECHNOLOGY

The article examines the tribological characteristics of electrospark coatings (ESCs) formed using non-contact technology. This technological approach makes it possible to reduce the defectiveness of coatings formed by ESA, as well as to obtain antifriction layers from non-conducting materials, in particular from oxide ceramics. Coatings of various origins obtained on titanium substrates were studied. It has been established that the formation of multicomponent and multifunctional electrospark coatings during the interaction of low-voltage discharge plasma with powder materials makes it possible to obtain protective layers with high antifriction properties, ensuring a reduction in the friction coefficient by 30-35% and wear rate by 1.5-2 times compared to the original material VT1 -0.

Key words: coating, plasma, morphology, friction, titanium.

1. Введение

Применение твердых и сверхтвердых покрытий на основе соединений титана, алюминия, азота, формируемых методами электроискрового легирования позволяет существенно улучшить триботехнические характеристики модифицируемых металлических субстратов [1, 2]. Одним из перспективных направлений развития машиностроительной отрасли является использование аддитивного производства. В настоящее время под аддитивными технологиями подразумевается процесс изготовления, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала как правило, слой за слоем, в отличие от вычитающего субтрактивного производства (механического производства) и традиционного формообразующего производства (литья, штамповки) [3]. Однако понятие аддитивности и аддитивных технологий в технике использовались задолго до появления 3D принтеров и ГОСТа Р 57558-2017 «Аддитивный технологический процесс. Базовые принципы. Часть 1 Термины и определения», который является переводной версией американского стандарта ISO/ASTM 52900я:2015. В настоящее время в технологии производства различного вида изделий идет процесс совместного

использования традиционных технологий и технологий, которые относят к аддитивным согласно ГОСТа Р 57558-2017. Данные объединенные технологические процессы также относят к аддитивным технологиям. Необходимо отметить, что в определениях понятий «аддитивность» и «технологический процесс», имеющих в специализированной научной литературе (ГОСТах, справочниках, учебниках, энциклопедических словарях и т.п.) нет того, что они применимы только в случае «.....создания физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала.....». Поэтому термины «аддитивные технологии» или «аддитивное производство (аддитивный технологический процесс)» имеют гораздо более широкое значение, чем изложенное в ГОСТе Р 57558-2017 и уже требуют корректировки. В работе [4] рассмотрен процесс создания композиционных покрытий на основе аддитивного производства, сочетающего лазерную наплавку и электроискровое легирование. В результате применения данного методологического подхода было достигнуто увеличение значений твердости аддитивного покрытия на 85%, возросла стойкость модифицированных металлических подложек к усталостным явлениям, достигнуто снижение значений шероховатости поверхности (R_a) на 82%. В связи с изменением прочностных характеристик получаемых покрытий возможно предположить, что применение метода электроискрового легирования, сочетающего в себе способ возбуждения плазменного разряда путем высоковольтного поджига и поддержания разряда низковольтным разрядом, позволит улучшить триботехнические характеристики модифицируемых металлических субстратов [1-8].

Целью исследований является изучение триботехнических характеристик аддитивных покрытий рефракторных металлов, получаемых методами бесконтактного электроискрового разряда при различных технологических режимах.

2. Методика исследований

В качестве объекта исследований использовали образцы титана ВТ1. Защитные слои формировали на оригинальной установке электроискрового легирования, позволяющей осуществить бесконтактный режим формирования покрытий, разработанной в Институте прикладной физики (г.Кишинев, Молдова). Составы и режимы покрытий сформированных покрытий приведены в таблице 1.

Таблица 1. Составы и режимы покрытий сформированных покрытий

№ образца	Состав покрытия	Режим формирования
1	ВТ1 (подложка)	0,3 Дж
2	TiC+Al	0,3 Дж
3	SiO ₂	0,3 Дж
4	TiN	0,3 Дж
5	Al+C	0,3 Дж

Изучение триботехнических характеристик покрытий проводили на машине трения УМТ-200. Схема трибоконтакта «сфера-плоскость», нормальная нагрузка на контртело (сталь ШХ15, Ø 5 мм) сферической формы составляло 30 Н. Время испытаний варьировали от 20 до 40 секунд, что позволяло оценить линейную интенсивность изнашивания с относительной погрешностью не более 10%. Частота вращения сферического контртела 200 оборотов в минуту. Морфологию поверхностей трения изучали методом оптической микроскопии на металлографическом комплексе производства ЗАО «Спектроскопические системы».

3. Результаты исследований

Согласно проведенных исследований формирование ЭИЛ покрытий приводит к снижению значений коэффициента трения в сравнении с исходным субстратом, изготовленным из сплава ВТ1-0 (рис.1). Исходя из полученных данных формирование покрытий на металлическом субстрате приводит к снижению коэффициента трения на 30-35%. Увеличение времени испытаний в два раза до 40 секунд уменьшает значения коэффициента трения до значений 0,86 пары трения ШХ15-ВТ1-0. Для образцов с покрытием наблюдается возрастание значений коэффициента трения до значений 0,8-0,85. Возможно предположить, что при данных временах эксплуатации исследуемых образцов происходит удаление покрытия из зоны трения и наблюдается возрастание значений коэффициента трения до величин характерных, как у исходного субстрата.\

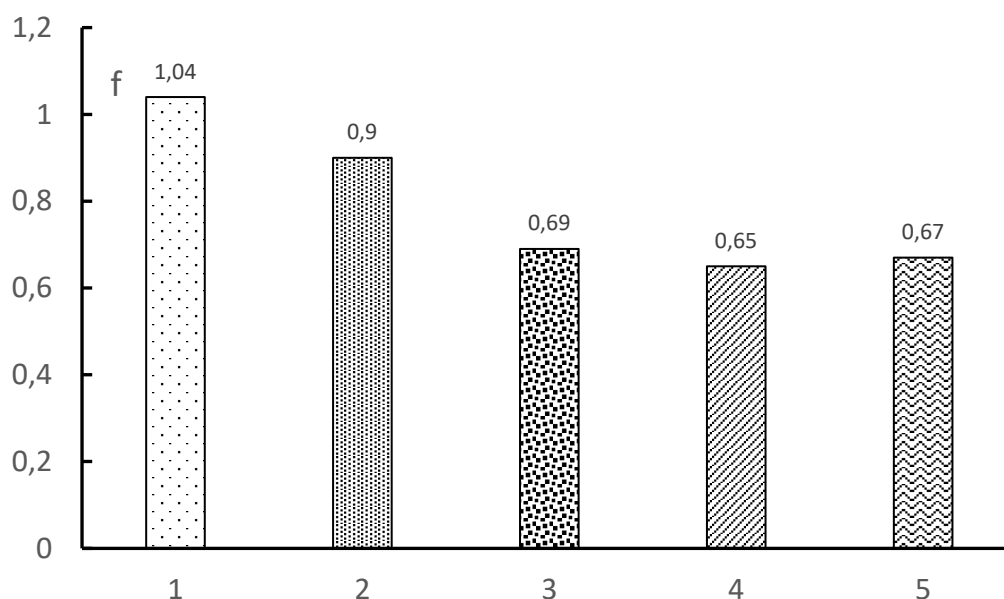


Рисунок 1. Коэффициент трения электроискровых покрытий, сформированных на металлической подложке ВТ1-0. Время испытаний 20 секунд.

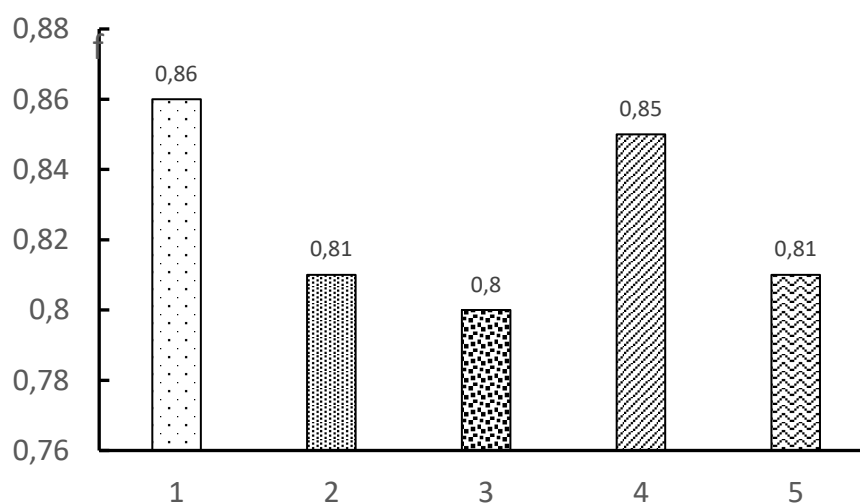


Рисунок 2. Коэффициент трения электроискровых покрытий, сформированных на металлической подложке ВТ1-0. Время испытаний 40 секунд.

Исследование морфологии поверхностей трения металлических образцов с электроискровыми покрытиями показало наличие глубоких полос резания на поверхности металлического субстрата для пары трения «сталь ШХ15-ВТ1-0», что свидетельствует о сильном адгезионном взаимодействии в зоне трения (рисунок 4).

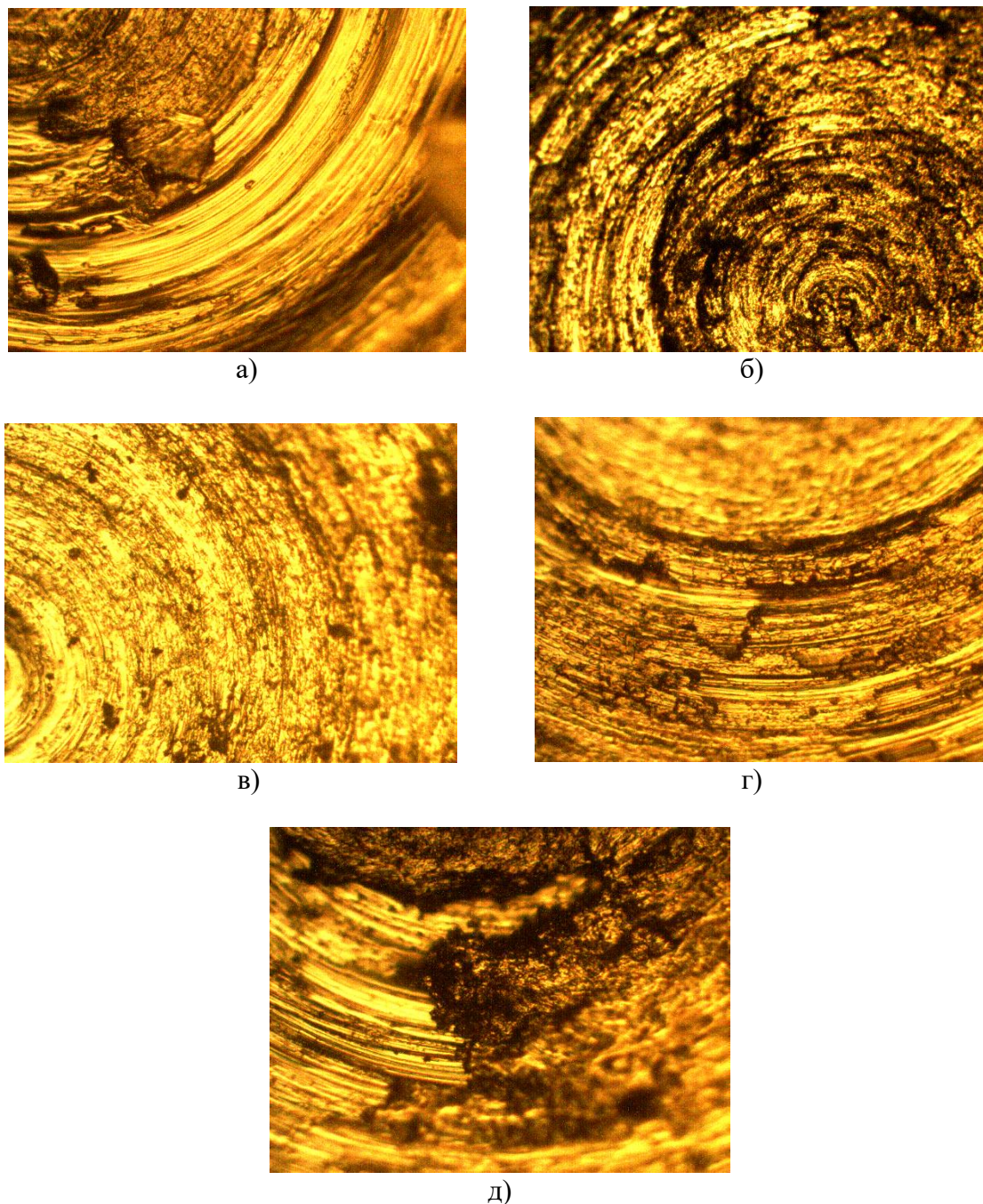


Рисунок 3. Морфология поверхностей трения сплава ВТ1-0 с электроискровым покрытием, время испытаний 20 секунд. а-исходный образец сплав ВТ1-0, б-сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №2, в- сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №3, г-сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №4, д- сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №5. (x100)

Согласно результатам, представленным на рисунке 3 фактически для всех исследуемых образцов с ЭИЛ покрытием, наблюдается наличие защитного электроискрового слоя в зоне трения. Увеличение времени испытаний пары трения ШХ15-ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ в два раза приводит лишь к частичному удалению ЭИЛ покрытия с поверхности металлического субстрата.

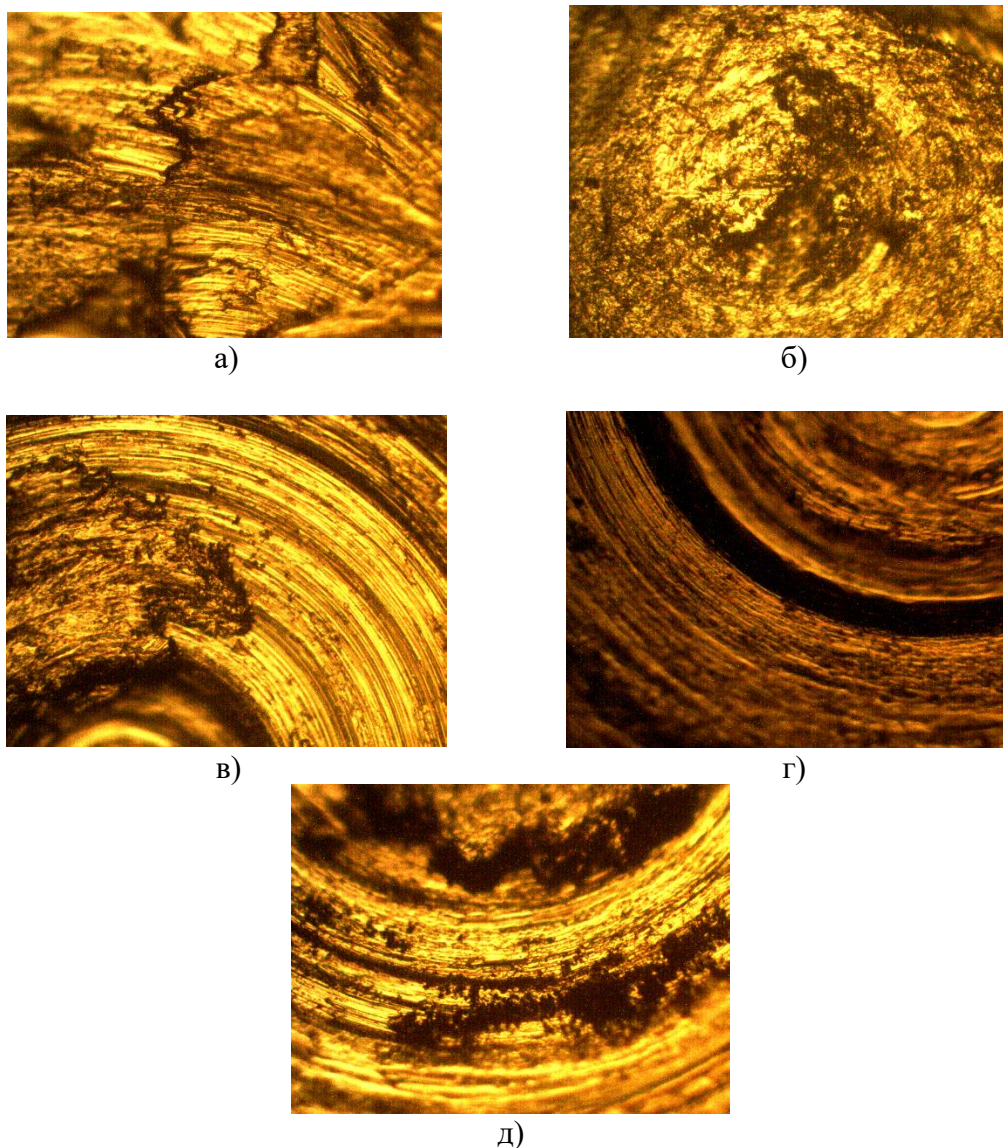


Рисунок 4. Морфология поверхностей трения сплава ВТ1-0 с электроискровым покрытием, время испытаний 20 секунд. а-исходный образец сплав ВТ1-0, б-сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №2, в- сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №3, г-сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №4, д- сплав ВТ1-0 с покрытием ЭИЛ №5. (х300)

Интенсивность изнашивания сплава ВТ1-0 с электроискровыми покрытиями в 1.5 – 2.5 раза меньше, чем у контрольного образца без ЭИЛ покрытий.

4. Заключение

Таким образом, формирование многокомпонентных и многофункциональных электроискровых покрытий при взаимодействии плазмы низковольтного разряда с порошковыми материалами позволяет получить защитные слои с высокими антифрикционными свойствами, обеспечивающими снижение значений коэффициента трения на 30-35% и интенсивности изнашивания в 1.5-2 раза по сравнению с исходным материалом ВТ1-0. Работы выполнены в рамках договора Т22МЛДГ-004, финансируемого БРФФИ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Структура и адгезионные характеристики электроискровых покрытий, получаемых по бесконтактной технологии / В. В. Михайлов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение: сб. науч. тр. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2023. – С. 206-213.
2. Е. В. Овчинников // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. В 2 ч. Ч. 2: сб. докладов 13-го Междунар. симпозиума, Минск, 5-7 апр. 2023 г. – Минск: Беларуская навука, 2023. – С. 255-260
3. ГОСТ Р 57558-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы» - С.12.
4. P. D. Enriquea, A.Keshavarzkermania, R.Esmaeilizadeha, S. Peterkin, H. Jahed, E. Toyserkania, N. Y. Zhou Enhancing fatigue life of additive manufactured parts with electrospark deposition post-processing Additive Manufacturing -2020-V.36 – p.1-13.
5. Kazak, N.N.; Mikhaylov, V.V.; Chekan, N.M.; Ovchinnikov, Y.V.; Eysymont, Y.I.; Kovsh, A.A. Korrozionnaya stoykost' i prochnostnyye kharakteristiki nanostrukturirovannykh pokrytiy, poluchennykh metodom elektroiskrovogo legirovaniya. In Proceedings of the International Conference Actual Strength Issues, Vitebsk, Belarus, 25–29 May 2020; pp. 320–322 [ISBN 978-985-6967-44-6.]
6. Овчинников Е. В., Михайлов В. В., Чекан Н. М. Технология синтеза наноструктур при электроискровом легировании в книге: Актуальные проблемы прочности. Монография. Под редакцией В. В. Рубаника. Молодечно, 2020. С. 345-358.
7. Овчинников Е.В. Физико-механические характеристики нанокпозиционных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования/ В.В. Михайлов [и др.] // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. Сер 6, Тэхніка. - 2019.- Т.9.- № 2.- С.45-53
8. Katinas, E.; Jankauskas, V.; Kazak, N.; Mikhailov, V. Improving Abrasive Wear Resistance for Steel Hardox 400 by Electro-Spark Deposition. / J. Frict. Wear -2019. – V. 40 – p.100–106, [ISSN 1068-3666].

Поступила в редколлегию 07.02.2024 г.

УДК 621.91.01

В. В. Полтавец, д-р техн. наук, доцент

(ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, Россия)

Тел.: +7(949) 3349248; E-mail: fimp.msмо@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМИ УПРАВЛЯЮЩИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

В статье предложен алгоритм определения оптимальной длительности периодов цикла «шлифование без управляющих воздействий – шлифование с управляющими воздействиями» по критерию минимальной удельной себестоимости обработки. Определена оптимальная длительность периодов цикла для плоского алмазного шлифования ванадиевой быстрорежущей стали P6M5Ф3.

Ключевые слова: технологическая себестоимость, переменные затраты, алмазное шлифование, режущая способность, сошлифованный материал.

V. V. Poltavets

OPTIMIZATION OF PROCESS OF DIAMOND GRINDING OF VANADIUM STEELS WITH PERIODIC SPARK-EROSION CONTROL ACTIONS

The paper proposes an algorithm for determining the optimal duration of cycle periods «grinding without control actions - grinding with control actions» by the criterion of minimum specific cost of machining. The optimal duration of cycle periods for flat diamond grinding of vanadium high-speed steel P6M5Ф3 is determined.

Keywords: manufacturing cost, variable expenses, diamond grinding, cutting capacity, ground material.

1. Введение

Основным показателем эффективности процесса технологических воздействий на предмет труда является технологическая себестоимость, т.е. сумма «только тех затрат, которые непосредственно связаны с данным вариантом технологической операции или технологического процесса» [1]. В качестве её расчётной величины при механической обработке принимают себестоимость станко-часа, которая включает наиболее весомые элементы, сказывающиеся на удельной себестоимости обработки [2]:

$$C_{сч} = Z_o + A + P_m + \mathcal{E} + I, \quad (1)$$

где Z_o – часовая заработная плата основного производственного рабочего;

A – амортизация производственного оборудования;

P_m – затраты на текущий ремонт и содержание оборудования;

$\mathcal{E}$ – затраты на технологическую электроэнергию;

I – возмещение затрат на расход инструмента.

Поскольку процесс шлифования по своей природе является нестационарным [3], то для условий нестационарности процесса время технологических воздействий (время шлифования) и время управляющих воздействий (время обновления рабочей поверхности шлифовального круга) целесообразно измерять в минутах. Соответственно, при определении технологической себестоимости в качестве расчётной величины будет использоваться себестоимость станко-минуты обработки:

$$C_{см} = C_{сч} / 60 = Z_{ом} + A_m + P_{тм} + \mathcal{E}_m + I_m, \quad (2)$$

где $Z_{ом}$, A_m , $P_{тм}$, $\mathcal{E}_m$, I_m – те же величины, что и в формуле (1), но приходящиеся на одну минуту работы шлифовального станка.

Составляющие себестоимости в формулах (1)-(2) рассчитываются по известным из технической литературы методикам [1, 4-6], но при этом от технологических режимов обработки и управляющих воздействий на рабочую поверхность круга (РПК) зависят только затраты на технологическую электроэнергию и затраты на алмазно-абразивный инструмент [7].

Таким образом, эти затраты являются переменными как относительно времени обработки, так и относительно времени обновления РПК при управляющих воздействиях [8]. Приведенные в технической литературе методики расчёта переменной части себестоимости разработаны преимущественно для схемы шлифования с фиксированными режимами и не учитывают связь величины затрат с состоянием РПК.

На основании анализа различных методов реализации управляющих воздействий на рабочую поверхность шлифовальных кругов из сверхтвёрдых материалов (СТМ) нами установлено, что наибольшим потенциалом для повышения степени управляемости технологической системой шлифования кругами из СТМ на металлической связке обладает электроэрозионный метод [9], который и принимается в дальнейшем в качестве основного метода обеспечения и поддержания высоких режущих свойств рабочей поверхности шлифовальных кругов.

Задача оптимизации при шлифовании с электроэрозионными воздействиями на РПК сводится к определению по критерию минимальной удельной себестоимости обработки оптимальных режимов электроэрозионных воздействий (ЭЭВ) на рабочую поверхность круга, осуществляемых одновременно с реализацией режимов резания, обеспечивающих максимальную производительность обработки при заданном качестве. В этом случае максимальная производительность обработки достигается как режимами резания, обеспечивающими максимальную производительность обработки, так и поддержанием высокой режущей способности круга во время обработки за счет дополнительных управляющих электроэрозионных воздействий, осуществляемых одновременно со шлифованием. Таким образом, управляющие электроэрозионные воздействия на РПК способствуют превращению нестационарного процесса в квазистационарный, когда режущая способность круга и производительность обработки стабилизируются во времени.

При ухудшении режущей способности РПК в результате изнашивания зёрен, а также засаливания межзёренного пространства и микрорельефа зёрен, определение условий, при которых интенсивность ухудшения режущей способности рабочей поверхности круга и ее восстановления с помощью электроэрозионных воздействий равны, нами предлагается выполнять на основе закономерностей, которые описывают изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга при шлифовании без электроэрозионных воздействий и в процессе восстановления режущей способности с помощью периодических ЭЭВ, осуществляемых одновременно со шлифованием образца на максимальных для используемого источника технологического тока режимах. В этом случае цикл обработки заготовки состоит из периодов «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» (рис. 1), а шлифование с периодическими электроэрозионными воздействиями на РПК представляет собой чередование таких циклов.

Как видно из рис. 1, шлифование без электроэрозионных воздействий на РПК на протяжении времени $\tau = T$ приводит к снижению режущей способности от величины Q_0 , которая была обеспечена электроэрозионной правкой, до установившейся величины

$Q_{уст}$, обусловленной износом зёрен и засаливанием межзёренного пространства. За время $\tau = \tau_{ээв}$ режущая способность РПК повышается до уровня $Q_{нр}$, когда рельеф рабочей поверхности будет характеризоваться высокой режущей способностью при приемлемом расходе инструментального материала.

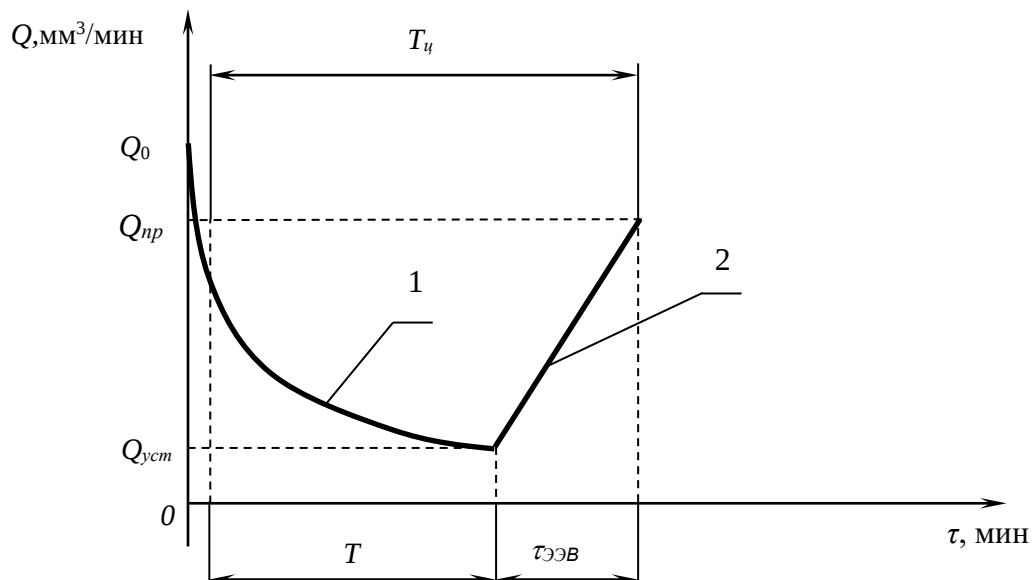


Рисунок 1. Периоды, составляющие цикл «шлифование без ЭЭВ (участок 1) – шлифование с ЭЭВ (участок 2)»

Таким образом, сущность оптимизации процесса обработки сводится к нахождению такой длительности периодов цикла T и $\tau_{ээв}$, а также величины $Q_{нр}$, при которых удельная себестоимость цикла шлифования длительностью $T_ц$ была бы минимальной.

Целью данной работы является определение оптимальной длительности периодов T и $\tau_{ээв}$ при алмазном шлифовании труднообрабатываемых ванадийсодержащих сталей, характеризующихся «плохой шлифуемостью ввиду высокой твердости карбидов ванадия» [10]. В качестве представителя этой группы материалов принята быстро-режущая сталь повышенной производительности марки Р6М5Ф3.

2. Алгоритм определения оптимальной длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» по критерию минимальной удельной себестоимости обработки

Удельная себестоимость шлифования представляет собой отношение себестоимости шлифования за время цикла $T_ц$ к объему материала V_m , удаленного с поверхности заготовки за это же время:

$$C_{уд}(T_ц) = \frac{C_{шл}(T_ц)}{V_m(T_ц)}, \quad (3)$$

где $C_{шл}$ – себестоимость цикла шлифования, для которого осуществляется расчет удельной себестоимости $C_{уд}$, руб;

V_m – объем материала, удаляемого с поверхности заготовки за цикл обработки $T_ц$, мм³.

Расчет объёма удаленного материала выполняется с использованием экспериментально определяемых законов изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга (ТЛРСШК) в периоды шлифования без ЭЭВ и шлифования с ЭЭВ.

Если оптимизация осуществляется по двум параметрам – времени шлифования без электроэрозионных воздействий T и времени формирования режущей способности РПК, до которой необходимо вести восстановление режущих свойств с помощью электроэрозионных воздействий, τ_{np} , то в этом случае целевая функция удельной себестоимости шлифования, сформированная на основе (3), приобретает вид:

$$C_{\text{óäö}}(\tau_{\text{íð}}, T) = \frac{C_{\text{ö}}(\tau_{\text{íð}}, T)}{V_{\text{í ö}}(\tau_{\text{íð}}, T)} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $C_{\text{ö}}(\tau_{np}, T)$ – технологическая себестоимость цикла, руб;

$V_{\text{м ö}}(\tau_{np}, T)$ – объем сошлифованного материала за цикл обработки, мм³.

Рассмотрим алгоритм оптимизации удельной себестоимости обработки, в котором учитываются:

1) законы изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга и шлифования с ЭЭВ (рис. 2, а);

2) законы изменения интенсивности расхода алмазов в периоды шлифования без ЭЭВ и в процессе восстановления режущих свойств электроэрозионными воздействиями на РПК (рис. 2, б).

В системе координат $Q_1 O \tau$ снижение режущей способности при шлифовании без электроэрозионных воздействий (кривая 1 на рис. 2, а) описывается уравнением

$$Q_1 = Q_{\text{шл}} = Q_{\text{уст}} + \Delta Q \exp[\beta_Q(\tau - \tau_0)], \quad (5)$$

где $\Delta Q = (Q_0 - Q_{\text{уст}})$ – амплитуда снижения значения ТЛРСШК при шлифовании до квазипостоянного значения, мм³/мин;

$Q_1, Q_{\text{уст}}, Q_0$ – соответственно значения текущей, установившейся и исходной ТЛРСШК, мм³/мин;

β_Q – эмпирический коэффициент, мин⁻¹;

τ_0 – момент времени, при котором экспериментально определялась исходная ТЛРСШК Q_0 , ($\tau_0 \approx 1$ мин).

Уравнение, описывающее восстановление режущей способности РПК в системе координат $Q_2 O_2 \tau_2$, при совпадении ее начала с началом системы координат $Q_1 O \tau$ имеет такой вид (прямая 2 на рис. 2, а):

$$Q_2 = K_Q \tau. \quad (6)$$

В точке Q_T , с которой начинается восстановление режущих свойств РПК, в результате переноса начала системы координат $Q_2 O_2 \tau_2$ в эту точку, уравнение (6) примет вид:

$$Q_2 = Q_{\text{шл+ЭЭВ}} = K_Q \cdot \tau + (K_Q \cdot T - Q_T). \quad (7)$$

Аналогичного вида зависимости описывают изменение расхода алмазов в периоды шлифования без ЭЭВ и в процессе восстановления режущих свойств круга с помощью электроэрозионных воздействий на РПК.

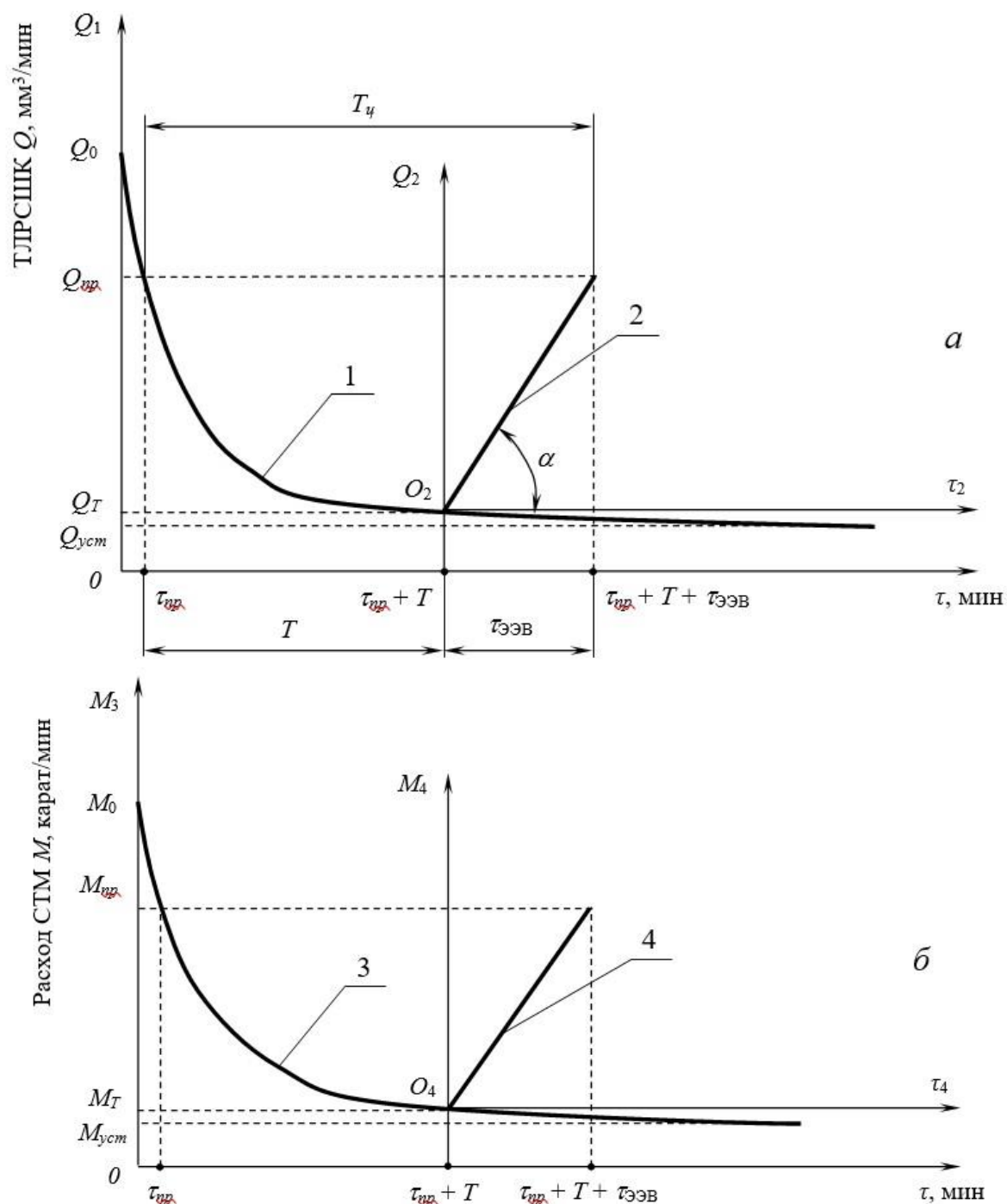


Рисунок 2. Изменение ТЛРСШК (а) и расхода алмазов (б) при шлифовании без ЭЭВ (линии 1, 3) и с электроэрозионными воздействиями на РПК (линии 2, 4) в различные периоды цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ»

Так, в частности, уравнение, описывающее расход алмазов при шлифовании без электроэрозионных воздействий в системе координат $M_3 O \tau$ (кривая 3 на рис. 2, б), имеет вид:

$$M_3 = M_{\text{ул}} = M_{\text{уст}} + \Delta M \exp [\beta_M (\tau - \tau_0)], \quad (8)$$

где $\Delta M = (M_0 - M_{\text{уст}})$ – амплитуда снижения расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ, карат/мин;

$M_3, M_{\text{уст}}, M_0$ – соответственно значения текущего, установившегося и исходного расхода алмазов, карат/мин;

β_M – эмпирический коэффициент, мин^{-1} ;

τ_0 – момент времени, при котором экспериментально определялся исходный расход алмазов M_0 , ($\tau_0 \approx 1$ мин).

Уравнение, описывающее расход алмазов при шлифовании с электроэрозионными воздействиями на РПК в системе координат $M_4 O_4 \tau_4$, при совпадении ее начала с началом системы координат $M_3 O \tau$ также имеет линейный вид (прямая 4 на рис. 2, б):

$$M_4 = K_M \tau. \quad (9)$$

В точке M_T , с которой начинается восстановление режущих свойств РПК, в результате переноса начала системы координат $M_4 O_4 \tau_4$ в эту точку, уравнение (9) примет вид:

$$M_4 = M_{\text{ул}+\text{ЭЭВ}} = K_M \cdot \tau + (K_M \cdot T - M_T). \quad (10)$$

Затраты на технологическую электроэнергию за время полного цикла T_u состоят из затрат на электрическую энергию в течение шлифования без ЭЭВ и затрат на электрическую энергию при шлифовании с ЭЭВ. Для плоского шлифования эти слагаемые определяются следующим образом:

– затраты на электроэнергию в период шлифования без ЭЭВ, руб,

$$\dot{Y}_{\text{оэ}} = \frac{\ddot{O}_{1\text{э}\dot{A}\dot{\sigma}}}{60} \int_{\tau_{\text{ид}}}^{\dot{O}+\tau_{\text{ид}}} \left(\frac{N_{\delta}}{\eta_{\dot{a}\dot{a}}} + N_{\dot{a}} + N_{\dot{i}} \right) d\tau; \quad (11)$$

– затраты на электроэнергию в период шлифования с ЭЭВ, руб,

$$\dot{Y}_{\text{оэ}+\text{ээв}} = \frac{\ddot{O}_{1\text{э}\dot{A}\dot{\sigma}}}{60} \int_0^{\tau_{\text{ээв}}} \left(\frac{N_p}{\eta_{\dot{a}\dot{a}}} + N_{\dot{a}} + N_{\dot{i}} + N_{\dot{y}\dot{y}\dot{a}} \right) d\tau. \quad (12)$$

В формулах (11) и (12):

N_p – мощность резания, кВт;

$\eta_{\dot{\sigma}\dot{\sigma}}$ – КПД главного привода плоскошлифовального станка;

$N_{\dot{\sigma}}$ – мощность двигателя насоса гидропривода продольной подачи стола плоскошлифовального станка, кВт;

N_o – мощность двигателя насоса подачи СОТС в зону резания, кВт;

$N_{\text{ээв}}$ – мощность ЭЭВ, кВт;

$C_{1\text{кВтч}}$ – стоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч).

В соответствии с рис. 2, а, время периодических ЭЭВ для восстановления режущих свойств РПК, определяется выражением

$$\tau_{\text{ЭЭВ}}(\tau_{np}, T) = (Q_{np} - Q_T) \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{K_Q} (Q_{np} - Q_T), \quad (13)$$

где α – угол наклона прямой 2 к оси абсцисс.

Воспользовавшись уравнением (5), описывающим изменение ТЛРСШК при шлифовании без ЭЭВ, найдем зависимости для расчета количества сошлифованного материала (в объемной размерности) в период приработки и в момент времени $\tau_{np} + T$, которые примут вид:

$$Q_{np} = Q_{уст} + \Delta Q \exp [\beta_Q (\tau_{np} - \tau_0)], \quad (14)$$

$$Q_T = Q_{уст} + \Delta Q \exp [\beta_Q (\tau_{np} + T - \tau_0)]. \quad (15)$$

После подстановки формул (14) и (15) в (13) длительность периода ЭЭВ на РПК $\tau_{\text{ЭЭВ}}$ как функции от τ_{np} и T будет определяться выражением

$$\tau_{\text{ЭЭВ}}(\tau_{i\delta}, T) = \frac{\Delta Q [\exp(\beta_Q (\tau_{i\delta} - \tau_{\text{эн}\delta})) - \exp(\beta_Q (T + \tau_{i\delta} - \tau_{\text{эн}\delta}))]}{K_Q}. \quad (16)$$

Затраты, связанные с расходом инструмента I , состоят из затрат на расход алмазов при шлифовании без ЭЭВ $I_{\text{шл}}$, руб,

$$\dot{E}_{\text{шл}}(\tau_{i\delta}, T) = \ddot{O}_{\text{шл}} \int_{\tau_{i\delta}}^{\tau_{i\delta} + \tau_{\text{ЭЭВ}}} \dot{I}_{\text{шл}}(\tau) d\tau, \quad (17)$$

и затрат на расход алмазов при шлифовании с ЭЭВ на РПК $I_{\text{шл}} + \text{ЭЭВ}$, руб,

$$\dot{E}_{\text{шл}}(\tau_{i\delta}, T) = \ddot{O}_{\text{шл}} \int_{\tau_{i\delta}}^{\tau_{i\delta} + \tau_{\text{ЭЭВ}} + T} \dot{I}_{\text{шл}}(\tau) d\tau. \quad (18)$$

В формулах (17) и (18):

$M(\tau)$ и $M_{\text{шл}} + \text{ЭЭВ}(\tau)$ – функции, описывающие расход алмазов соответственно при шлифовании без ЭЭВ и с ЭЭВ (формулы (8) и (10)), карат/мин;

$C_{\text{алм}}$ – стоимость карата алмазов, руб/карат.

Объем сошлифованного материала за время цикла $V_{\text{мц}}(\tau_{np}, T)$, состоит из объемов удаленного материала за период шлифования без ЭЭВ $V_{\text{мшл}}$ и за период шлифования с ЭЭВ $V_{\text{мшл}} + \text{ЭЭВ}$:

$$V_{\text{мц}}(\tau_{np}, T) = V_{\text{мшл}}(\tau_{np}, T) + V_{\text{мшл}} + \text{ЭЭВ}(\tau_{np}, T). \quad (19)$$

Объем удаленного материала за период шлифования без ЭЭВ определяется путем интегрирования уравнения (5) на отрезке времени от τ_{np} до $\tau_{np} + T$:

$$V_{i\ \partial\ddot{e}}(\tau_{i\partial}, T) = \int_{\tau_{i\partial}}^{T+\tau_{i\partial}} [Q_{\partial\ddot{n}\partial} + \Delta Q \exp(\beta_Q(\tau - \tau_0))] d\tau. \quad (20)$$

Объем удаленного материала за период ЭЭВ определяется интегрированием уравнения (7) на соответствующем отрезке времени (см. рис. 2, а):

$$V_{i\ \partial\ddot{e} + \dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\partial}, T) = \int_{\tau_{i\partial} + T}^{\dot{O} + \tau_{i\partial} + \tau_{\dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}} [K_Q \cdot \tau + (K_Q \cdot T - Q_T)] d\tau. \quad (21)$$

С учетом зависимостей (2), (11)-(12), (13), (17)-(18), (20)-(21) общий вид целевой функции оптимизации процесса алмазного шлифования может быть представлен следующим выражением:

$$C_{\partial\ddot{a}\partial}(\tau_{i\partial}, \dot{O}) = \frac{(C_{\partial\ddot{i}} + \dot{A}_{\partial} + \dot{D}_{\partial\ i})(T + \tau_{\dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\partial}, \dot{O})) + \dot{Y}_{\partial\ddot{e}}(\tau_{i\partial}, \dot{O}) + \dot{E}_{\partial\ddot{e}}(\tau_{i\partial}, \dot{O}) + \dot{Y}_{\partial\ddot{e} + \dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\partial}, \dot{O}) + \dot{E}_{\partial\ddot{e} + \dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\partial}, \dot{O})}{V_{i\ \partial\ddot{e}}(\tau_{i\partial}, T) + V_{i\ \partial\ddot{e} + \dot{Y}\dot{Y}\dot{A}}(\tau_{i\partial}, T)}. \quad (22)$$

Минимум функции (22) отыскивается численными методами с помощью специализированных математических пакетов.

3. Расчет оптимальных значений периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» для ванадиевой стали Р6М5Ф3

Исходными данными для решения задачи оптимизации с использованием функции (22) при плоском алмазном шлифовании являются: режимы резания – скорость круга V_k , скорость стола V_{cm} и сила поджима заготовки к РПК P_n ; режимы ЭЭВ – напряжение холостого хода U_{xx} , максимальный ток периодических ЭЭВ I_n ; паспортные данные станка, величина средней номинальной заработной платы станочника; затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования и источника технологического тока, стоимость электроэнергии и стоимость алмазов.

Закон изменения текущей лимитированной режущей способности круга в процессе шлифования без ЭЭВ и в процессе шлифования с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК, а также закон изменения текущего расхода алмазов при шлифовании без ЭЭВ и при шлифовании с ЭЭВ с целью восстановления режущих свойств РПК определяли экспериментальным путём.

Эксперименты с целью определения законов изменения текущей лимитированной режущей способности круга и текущего расхода алмазов в процессе шлифования стали Р6М5Ф3 проводили на режимах $V_k = 35$ м/с, $V_{cm} = 6$ м/мин и силе поджима заготовки к РПК $P_n = 80$ Н.

Электроэрозионные воздействия на РПК с целью восстановления режущей способности круга выполняли с величиной среднего тока $I_{cp} = 10$ А при напряжении холо-

стого хода $U_{xx} = 60$ В. Рабочая среда для ЭЭВ представляла собой 0,3%-ный водный раствор кальцинированной соды.

Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 100/80-4-М2-01 представлено на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что поверхность, описываемая функцией удельной себестоимости шлифования, имеет выраженный экстремум.

В результате решения задачи оптимизации для алмазных кругов различных зернистостей найдены оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ», которые приведены в табл. 1.

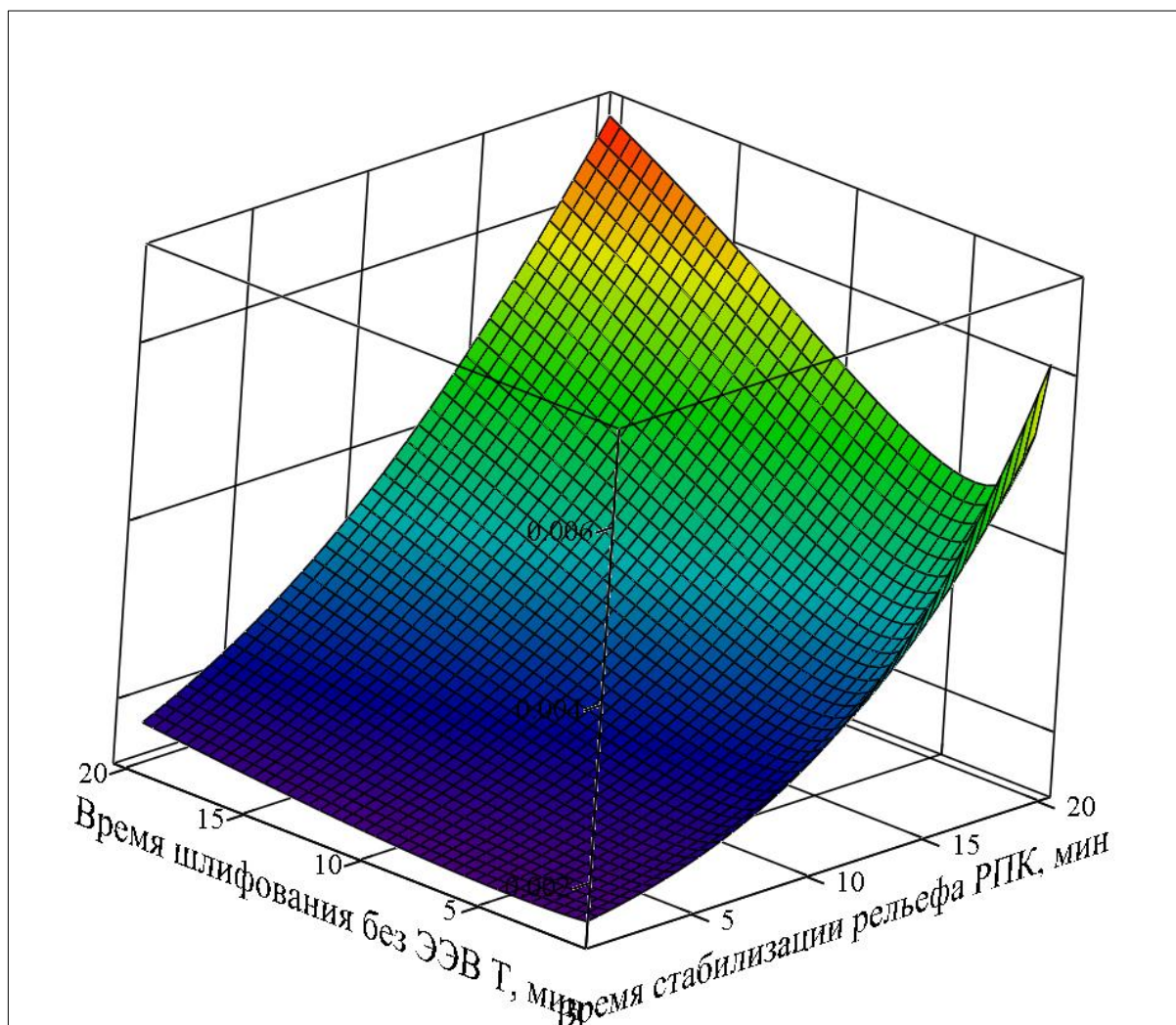


Рисунок 3. Влияние времени формирования параметров РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, τ_{np} , и длительности периода шлифования без ЭЭВ, T , на удельную себестоимость плоского врезного шлифования стали Р6М5Ф3 алмазным кругом АС6 100/80-4-М2-01

Таблица 1. Оптимальные значения периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» при обработке ванадиевой быстрорежущей стали Р6М5Ф3 кругами из синтетических алмазов АС6 различных зернистостей

Наименование периода	Зернистость		
	100/80	160/125	200/160
Время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, t_{np} , мин	0,01	0,01	0,01
Время шлифования без ЭЭВ, T , мин	5,41	4,28	5,54
Время шлифования с ЭЭВ, $t_{ЭЭВ}$, мин	5,66	5,48	5,16

Из табл. 1 следует, что время формирования параметров рельефа РПК, до которых необходимо восстанавливать режущую способность круга, t_{np} , пренебрежимо мало по сравнению со временем периода шлифования без ЭЭВ, T , и временем шлифования с ЭЭВ, осуществляемыми одновременно с обработкой, $t_{ЭЭВ}$. Следовательно, при оптимизации длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» это время можно не учитывать.

Различие между оптимальными значениями времени шлифования без ЭЭВ, T , и времени шлифования с ЭЭВ, осуществляемыми одновременно с обработкой, $t_{ЭЭВ}$, для алмазных кругов трёх исследованных зернистостей статистически несущественно.

4. Заключение

При обработке ванадиевых сталей алмазными шлифовальными кругами время периода шлифования без электроэрозионных воздействий, T , и время шлифования с ЭЭВ, осуществляемыми одновременно с обработкой, $t_{ЭЭВ}$, соизмеримы и для трёх исследованных зернистостей кругов должны составлять 5-6 минут, исходя из достижения минимальной удельной себестоимости обработки.

Предложенный алгоритм определения оптимальной длительности периодов цикла «шлифование без ЭЭВ – шлифование с ЭЭВ» по критерию минимальной удельной себестоимости обработки может быть распространён на другие виды обрабатываемых материалов и на иные способы восстановления режущей способности шлифовальных кругов из СТМ, при использовании которых управляющие воздействия осуществляются без прерывания процесса обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проничев, Н. Д. Проектирование технологии в машиностроении и оценка её экономической эффективности: электронное учебное пособие / Н. Д. Проничев, А. П. Шулепов; Самарский гос. аэрокосмический ун-т имени академика С. П. Королева. – Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2010. – 37 с.
2. Экономическое обоснование выбора алмазного круга/ М. Ф. Семко, М. Д. Узунян, Э. П. Юфа. – Харьков: Прапор, 1971. – 100 с.
3. Полтавец, В. В. Оптимизация режимов шлифования с учётом нестационарности процесса / В. В. Полтавец, П. Г. Матюха // Научные труды ДонНТУ. Серия Машиностроение и машиноведение. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – Вып. 1 (190)'2013. – С. 81-91.
4. Экономическое обоснование технологических процессов машиностроительных производств: учебное пособие / И. В. Пичужкин и др.; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 160 с. – ISBN 5-89368-760-4.

5. Князева, И. А. Экономика машиностроительного производства: учебное пособие / И. А. Князева. – Киров: ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2015. – 220 с.

6. Мельников, А. С. Технология машиностроения: основы снижения затрат на производство машины: учебное пособие / А. С. Мельников, М. А. Тамаркин, А. И. Азарова; Донской гос. технический ун-т. – Ростов-на-Дону: Донской гос. технический ун-т, 2013. – 167 с.

7. Полтавец, В. В. Себестоимость шлифования с управляющими воздействиями на РПК / В. В. Полтавец // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научн. трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вып. 10. – С. 202-207.

8. Полтавец, В. В. Определение переменной части себестоимости алмазного шлифования с управлением состоянием рабочей поверхности круга / В. В. Полтавец, О. А. Гаркуша // Инженер. Студенческий научно-технический журнал. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – № 3. – С. 102-104.

9. Полтавец, В. В. Повышение степени управляемости технологической системой шлифования кругами из сверхтвердых материалов за счет воздействий на характеристики инструмента / В. В. Полтавец // Научные труды ДонНТУ. Серия Машиностроение и машиноведение. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – Вып. 6 (154). – С. 79-86.

10. Зубков, Н. Н. Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов / Н. Н. Зубков // Наука и образование: электронный научно-технический журнал. – Москва: МГТУ имени Н.Э. Баумана. – № 5, май 2013 г. – С. 75-100.

Поступила в редколлегию 09.02.2024 г.

УДК 621.315.611

Н. К. Полуянович, М. Н. Дубяго, О. В. Качелаев
(Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия)
Тел: 89508609983, E-mail: nik1-58@mail.ru

РАДИКАЛЬНО-ЦЕПНОЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧАСТИЧНЫМИ РАЗРЯДАМИ

Статья посвящена разработке метода неразрушающего контроля материала изоляции кабельных систем. Рассмотрена деструкция полимерного материала, обусловленная радикально-цепным механизмом разрушения. Приведен механизм деструкции полиэтилена, вызванный электронной и ионной бомбардировкой под действием частичных разрядов (ЧР). Показано образование сшивок, связанное с активацией двойных связей при передаче электронной энергии возбуждения от полиэтиленовой цепи.

Ключевые слова: надежность кабельных систем, разрушение полимерного изоляционного материала, радикально-цепной механизм разрушения, частичные разряды, диагностика, остаточный ресурс.

N. K. Poluianovich, M. N. Dubyago, O. V. Kachelaev

RADICAL-CHAIN MECHANISM OF DESTRUCTION OF POLYMERIC ELECTRICAL INSULATING MATERIALS BY PARTIAL DISCHARGES

The article is devoted to the development of a method of non-destructive testing of the insulating material of cable systems. The destruction of a polymer material caused by a radical chain mechanism of destruction is considered. The mechanism of destruction of polyethylene caused by electron and ion bombardment under the action of partial discharges (PD) is given. The formation of cross-links associated with the activation of double bonds during the transfer of electronic excitation energy from a polyethylene chain is shown.

Keywords: reliability of cable systems, destruction of polymer insulating material, radical chain mechanism of destruction, partial discharges, diagnostics, residual resource.

1. Введение

Силовые кабельные линии (СКЛ) являются одним из основных элементов электрических сетей систем электроснабжения [1]. Главной задачей эксплуатационного персонала является контроль и поддержание электроизоляционных свойств изоляции на уровне, исключающем её аварийный выход из строя [2]. Успешное решение данной проблемы невозможно без представления о физических процессах и факторах, вызывающих старение изоляционных материалах (ИМ) [2, 3]. Проблема образования и развития ЧР в ИМ в условиях ее эксплуатации представляет большой интерес как для персонала, эксплуатирующего оборудование, так и для разработчиков оборудования и исследователей ИМ. Таким образом целью работы является разработка методики диагностирования остаточного ресурса электроизоляции КЛ, основанная на контроле параметров и технического состояния.

2. Основное содержание и результаты работы

Виды дефектов в СКЛ. Для оценки степени деструкции электроизоляционного материала выделяют следующие виды дефектов: дефекты, вызванные ошибками проектирования; ухудшение свойств изоляции в результате недопустимого перегрева токами нагрузки из-за ошибочно заниженного сечения, жил кабеля; повреждения в аварийных режимах из-за неправильного выбора защитной аппаратуры и т.п.

К заводским дефектам, возникающим при производстве кабелей относятся трещины или сквозные отверстия в оболочке; заусенцы на проволоках токопроводящих жил и т.п.

К дефектам прокладки кабеля относятся крутые изгибы кабеля на углах поворота трассы; механические повреждения (изломы, вмятины, порезы, перекрутка кабеля); несоблюдение допустимых расстояний до объектов которые могут негативно влиять на кабели (теплотрасса, рельсовые пути электрифицированного транспорта) и т.п.

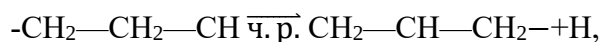
Характеристики и методы регистрации ЧР. Возникновение каждого единичного ЧР приводит к выделению в ИМ энергии $W_{\text{чр}}$ [2]. Разрушающее действие ЧР на диэлектрические материалы обуславливается следующими факторами [2]: – воздействием излучения, возникающего в процессе развития ЧР; – воздействием химически активных продуктов (озон, окислы азота и др.), образующихся в воздухе (газах) во включении при наличии ЧР; – развитием древовидных побегов (дендритов); – тепловым воздействием.

Диагностика СКЛ по частичным разрядам. Эффективным, неразрушающим методом диагностирования электротехнического оборудования под рабочим напряжением является метод диагностики по ЧР, позволяющий выявлять быстроразвивающиеся локальные дефекты [1]. Метод основан на локализации ЧР в проблемных местах кабельной линии по фазам СКЛ. На основании полученных формул составлена математическая модель развития ЧР [1] и формирования теплового пробоя:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{в.пр}} \varepsilon_{\text{п}} h}{\delta K_{\text{н}} \varepsilon_{\text{в}} \sqrt{2}}; \\ U_{\text{в}} = U \varepsilon_{\text{п}} \cdot h_{\text{в}} / h; \\ q_{\text{чр}} = q / \left(1 + \frac{\varepsilon_{\text{в}}}{\varepsilon_{\text{п}}} \left(1 - \frac{h_{\text{в}}}{h} \right) \right); \\ W_{\text{чр}} = q_{\text{чр}} U_{\text{чр}} (1 + \eta) / \sqrt{2}; \\ Q_{\text{oi}} = \Delta U_{\text{л,раб}}^2 \omega C_{\text{it}} g \delta_i / l_i. \end{array} \right. \quad (1)$$

Критериями оценки работоспособности высоковольтных кабелей по данному методу являются: напряжение возникновения ЧР $U_{\text{в}}$; уровень ЧР q ; коэффициент старения $P_{\text{СТ}}$; коэффициент нелинейности Q_{S} , а также частота ЧР и их интенсивность [1].

Радикально-цепной механизм разрушения. Механизм деструкции полиэтилена, обусловленный электронной и ионной бомбардировкой, при действии ЧР представим следующими реакциями и процессами. При сшивании полиэтилена образуются свободные радикалы типа $\text{—CH}_2\text{—}\dot{\text{C}}\text{H—CH}_2\text{—}$ и атома водорода в результате разрыва связи углерод – водород при бомбардировке полиэтилена электронами и ионами ЧР:



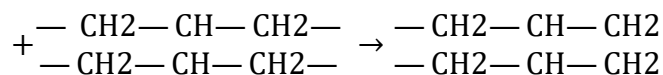
где буквы ч.р. обозначают воздействие ЧР.

Атом водорода отрывает другой атом у соседней цепи, оставляя новый свободный радикал в положении, благоприятном для реакции с первым свободным радикалом, и образуя молекулярный водород:

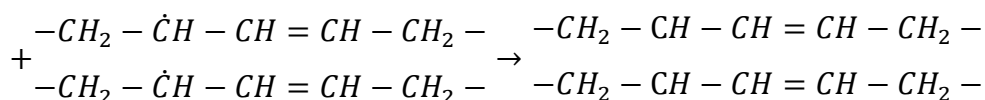


Скорость выделения водорода характеризует разложение диэлектрического материала при воздействии ЧР.

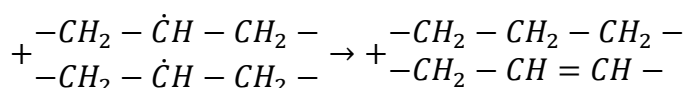
Появившиеся свободные радикалы взаимодействуют и образуют связи между цепями:



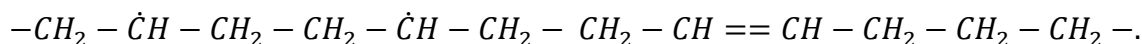
При образовании радикалов типа $\text{---CH}_2\text{---CH---CH}=\text{CH---CH}_2\text{---}$ сшивание можно представить по схеме [8]:



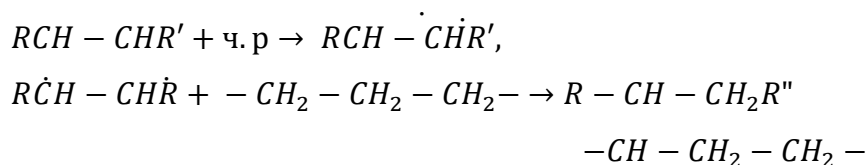
Образование двойных связей трансвиниленового типа в полиэтилене (ПЭ) при действии ЧР объясняется как результат взаимодействия двух радикальных центров в соседних полимерных цепях, что сопровождается переносом атома водорода [8]:



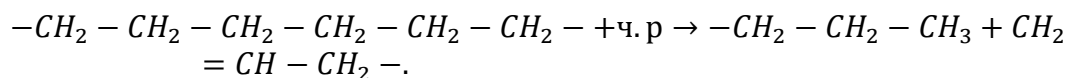
и миграции свободной валентности вдоль цепи до встречи с другой свободной валентностью [16]:



При воздействии ЧР количество двойных связей трансвиниленового типа с увеличением дозы поглощенной энергии достигает насыщения. При определенной концентрации этих связей начинается их распад. Это явление, возникающее в результате активации двойных связей при передаче энергии электронного возбуждения от полиэтиленовой цепи, связывают с образованием поперечных связей [8]:

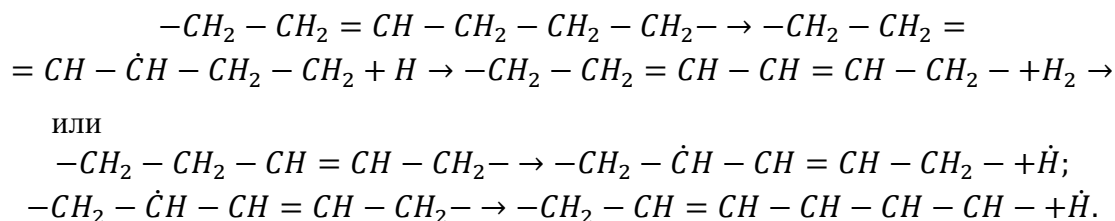


Одновременно с процессом сшивания протекает и процесс деструкции, который сводится к разрыву химической связи в главной цепи ПЭ, в частности, под действием ионизирующего излучения. Разрыв связей между атомами углерода в главной цепи ПЭ с образованием двух осколков цепи [4]:

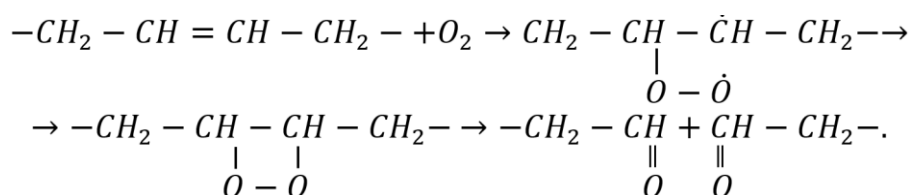


При воздействии ЧР на ПЭ в воздухе происходит также изменение соотношения групп CH_3/CH_2 , что является результатом разрыва цепи.

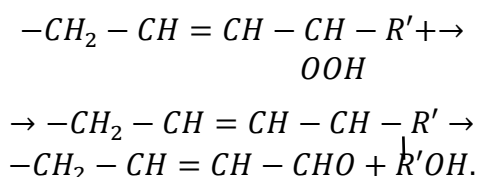
Образование второй сопряженной связи возможно также после появления аллильного радикала [17]:



Примерно половина всего выделяющегося водорода образуется при возникновении углерод-углеродных двойных связей [4]. Увеличение интенсивности поглощения полосы 1640 см^{-1} свидетельствует о разрыве цепей ПЭ [4], а при разрыве главной цепи должны образовываться сопряженные двойные связи винильного типа [4]. Наличие насыщения в изменении интенсивности поглощения полосы 1640 см^{-1} как при воздействии ЧР в воздухе указывает на возможность не только увеличения количества сопряженных двойных связей с ростом дозы поглощенной энергии, но и их разрушения при достижении определенной концентрации. Окисление ПЭ по месту двойной связи, вызванное ЧР, с образованием карбонильных групп и разрывом цепи, протекает по схеме [4]:



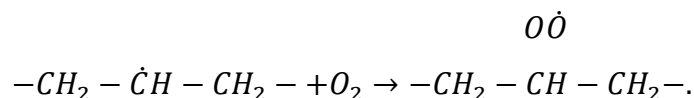
Окисление полимеров рассматривается так же, как процесс, протекающий с разрывом цепи у метиленовых групп (в основном) в альфа-положении к двойным связям [4]. Метиленовая группа, соседняя с двойной связью, более чувствительна к окислению, и этот процесс происходит следующим образом [20]:



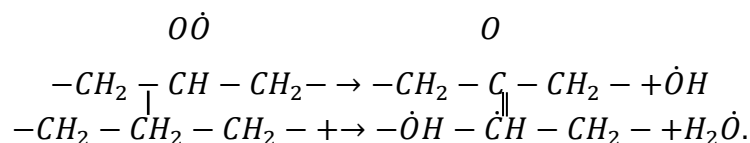
Однако не наблюдается увеличения интегральной интенсивности поглощения в области $3350\text{--}3450 \text{ см}^{-1}$ (группы OH) при воздействии на ПЭ ЧР в среде воздуха в течение 40-45 ч. Таким образом, при гамма-облучении полиэтилена на воздухе происходит образование структур, содержащих группы, OH, количество которых увеличивается с увеличением дозы облучения.

При дальнейшем росте времени воздействия ЧР интенсивность увеличивается, достигая насыщения, так как одновременно с образованием в поверхностном слое ПЭ структур, содержащих группы OH, происходит их разрушение бомбардирующими электронами и ионами ЧР.

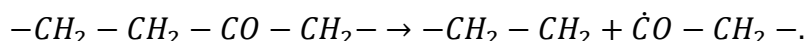
Свободные радикалы, образовавшиеся при этом, вступают в реакцию с кислородом, образуя пероксирадикалы:



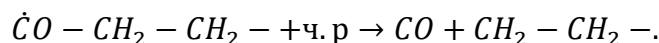
Последующие реакции с участием свободных радикалов, обуславливающие образование карбонильных групп, разрыв основных цепей полиэтилена, выделение H_2O , CO и CO_2 , которые могут проходить двумя различными путями, представим одну из них схемой [4]:



После этого реакция продолжается. Наличие карбонильных групп в главной цепи полиэтилена обуславливает ослабление межуглеродных связей и последующее дробление цепи [4]:



Распад карбонильных групп, по-видимому, инициируется ЧР и происходит следующим образом:



Этим процессом, наряду с механическим разрушением окисленных структур, обуславливается наличие насыщения в зависимости интенсивности поглощения полосы 1720 см^{-1} в инфракрасном спектре ПЭ от времени воздействия ЧР. Для выяснения закономерностей изменения свойств и характеристик диэлектрических материалов при воздействии ЧР можно использовать метод инфракрасной (ИК) спектроскопии, как один из наиболее информативных. При этом контроль изменения ИК спектров проводится по интегральной интенсивности полос поглощения $A_{\text{и}}$.

На рисунке 1,а приведены зависимости интенсивности ИК спектра полосы поглощения ПЭ ($A_{\text{и}}$) от плотности тока в диэлектрике (j), На рисунке 1, б приведены зависимости интенсивности $A_{\text{и}}$ от времени воздействия $\tau_{\text{в}}$ ($\tau_{\text{в}} > 40$ ч.) при $j = 0,2\text{ мкА/мм}^2$ (штриховые линии) и $2,5\text{ мкА/мм}^2$ (сплошные линии) полос поглощения инфракрасных спектров ПЭ 1720 (1); 890 (2); $721\text{--}731$ (5, 7); $1460\text{--}1470$ (4, 6); 1305 см^{-1} (5,5). На рисунке 1, в приведены зависимости интенсивности $A_{\text{и}}$ от времени $\tau_{\text{в}}$ полосы поглощения 1720 см^{-1} инфракрасного спектра ПЭ (3), ПЭ + 1% БК СО, ПЭ + 1% ФБНА–фенил-бета-нафтиламин (2), ПЭ + 1% ФБНА, облученного дозой $0,05\text{ МДж/кг}$ (4), ПЭ и ПЭ + 1% ФБНА, облученных дозой $0,5\text{ МДж/кг}$ (5). Образовавшиеся радикалы вступают в реакцию с кислородом, и цепная реакция разрушения полиэтилена под действием ЧР продолжается. В результате окисления СО в плазме разряда образуется CO_2 . Таким образом, радикально-цепной механизм разрушения полимерных диэлектрических материа-

лов при воздействии ЧР наиболее полно отражает явления и процессы разрушения, вызванные ЧР. Знание механизма разрушения позволяет наметить пути и способы предотвращения или торможения этих процессов и, тем самым пути и способы повышения срока службы изоляции СКЛ, подвергающихся воздействию ЧР [5].

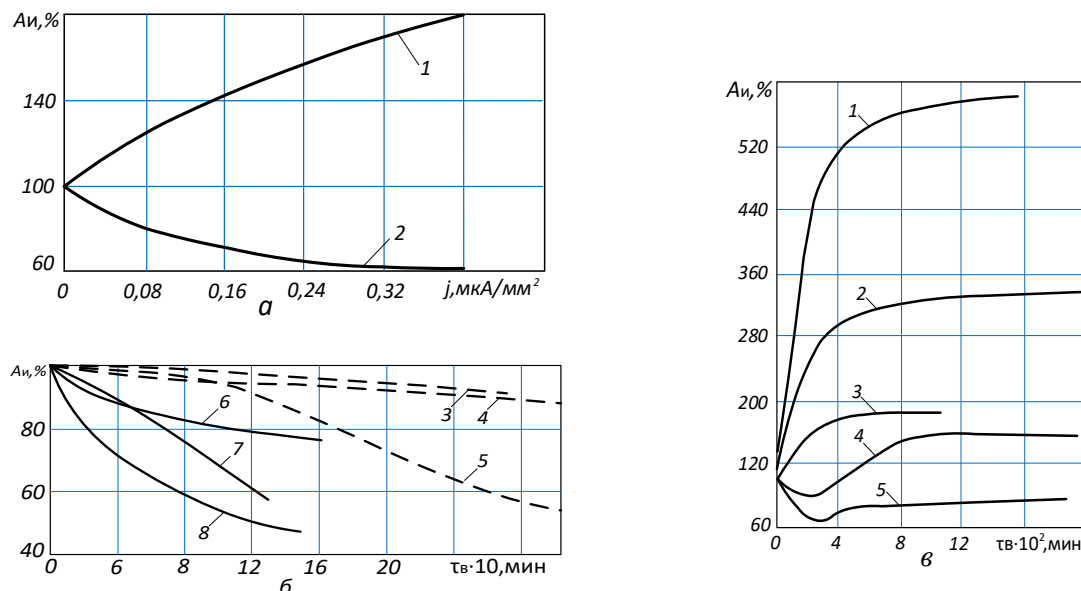


Рисунок 1. Зависимости интенсивности A_i от плотности тока j

Экспериментальные исследования. Для исследования процесса развития ЧР а, следовательно, механизмов старения и электрического пробоя ИМ, необходимо определить параметры ЧР, а именно установить связь между напряжением возникновения $U_{чр}$, его максимальным значением кажущегося заряда $q_{чр}$ и высотой включения h_v . На рисунке 2 представлены результаты измеренных уровней интенсивности ЧР, а также распределение ЧР в изоляции вдоль КЛ.

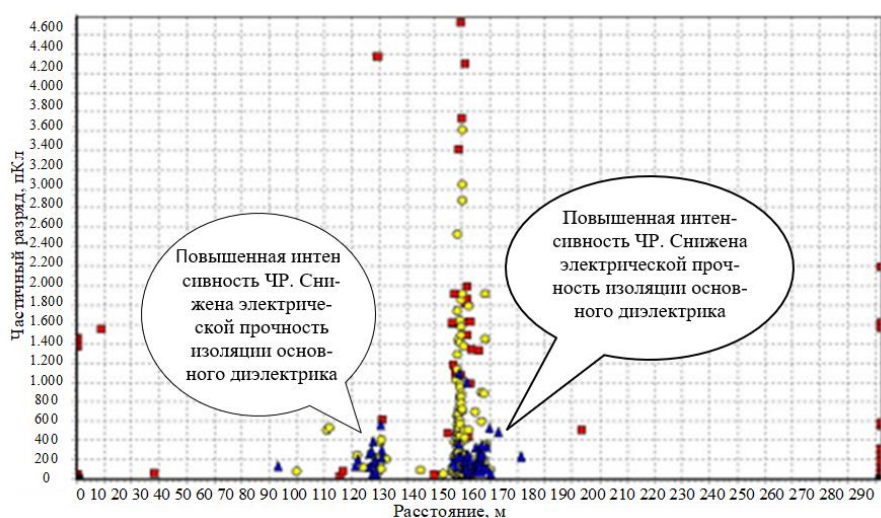


Рисунок 2. Распределение и интенсивности ЧР в изоляции КЛ

Результаты проведенного обследования кабельной линии позволяют оценить ее техническое состояние, так как: – на отметках 100–110 м, 130–150 м по всем фазам от ТП–173 зафиксирована повышенная интенсивность ЧР; – обнаруженные источники ЧР свидетельствуют о наличии включений в изоляции в кабельной линии.

3. Заключение

Разработана методика диагностирования остаточного ресурса электроизоляции КЛ, основанная на контроле параметров и технического состояния. Предложенная методика отличается от существующих использованием напряжения, выделяемого самим ЧР. Обнаруженные источники ЧР свидетельствуют о наличии включений в изоляции кабеля. Если происходит общее изменение структуры ИМ, например, изменение химической структуры, связанное с развитием теплового пробоя, то необходимо иметь в виду прежде всего мощность (Р) ЧР. Предложенная методика диагностирования ИМ СКЛ в условиях эксплуатации позволяет оценивать текущее состояние изоляции (место и степень пробоя, геометрические характеристики включений) и прогнозировать остаточный ресурс кабельных линий электрических сетей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дубяго М. Н., Полуянович Н. К. Совершенствование методов диагностики и прогнозирования электроизоляционных материалов систем энергоснабжения. Монография // Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – 192 с.
2. Кучинский, Г. С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях [Текст] // Ленинград: Энергия, Ленинград, отд., 1979. – 224 с.
3. Anders G. J., Napieralski A., Orlikowski M., Zubert M. Advanced Modeling Techniques for Dynamic Feeder Rating Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Vol. 39. – № 3. – P. 619–626.
4. Н. С. Ильченко, В. М. Кириленко. Полимерные диэлектрики. // Техника, 1977, 160 с.
5. Dubyago, M., Poluyanovich, N. Partial Discharge Signal Selection Method for Interference Diagnostics of Insulating Materials // Conference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW 2019 8792693, pp. 124-127.

Поступила в редколлегию 07.02.2024 г.

¹И. А. Яицков, д-р техн. наук, профессор, ^{1,2}П. А. Поляков, канд. техн. наук, доцент,
³Н. А. Задаянчук, ²Р. Н. Дедусенко, магистр

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, РФ

²Кубанский государственный технологический университет, РФ

³Кубанский государственный университет, РФ

¹E-mail: via_nis@rgups.ru

²E-mail: polyakov.pavel88@mail.ru

³E-mail: nina-nuska@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АДАПТАЦИИ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Проанализированы конструктивные решения тормозных устройств дисково-колодочного типа, применяемые на различных видах транспорта и технологических машин, на основе необходимости адаптивности. В результате анализа были намечены пути дальнейших исследований по целесообразности разработки адаптивных систем торможения транспортных средств. Основным условием является многовекторность отслеживания параметров отвечающих за приспособленность тормозных устройств к изменяющимся внешним условиям. В качестве параметров отвечающих за адаптивность тормозных устройств, наравне с существующими антиблокировочными системами и программами-ассистентами необходимо применять дополнительные системы обеспечивающие связь между нагрузкой, приходящейся на «тормозящее» колесо и развиваемым этим колесом тормозным моментом. Предложена схема работы адаптивной системы торможения на примере нагруженного и разгруженного «тормозящего» колеса транспортного средства.

Ключевые слова: тормозные устройства дисково-колодочного типа, антиблокировочная система, адаптивность торможения, привод, конструктивное исполнение.

I. A. Yaitskov, P. A. Polyakov, N. A. Zadayanchuk, P. N. Dedusenko

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF BRAKE ADAPTATION SYSTEMS

The design solutions of disc-block type braking devices used on various types of transport and technological machines are analyzed on the basis of the need for adaptability. As a result of the analysis, the ways of further research on the feasibility of developing adaptive vehicle braking systems were outlined. The main condition is the multi-vector tracking of the parameters responsible for the adaptability of braking devices to changing external conditions. As parameters responsible for the adaptability of braking devices, along with existing anti-lock systems and assistant programs, it is necessary to use additional systems that provide a link between the load on the "braking" wheel and the braking torque developed by this wheel. A scheme of operation of an adaptive braking system is proposed using the example of a loaded and unloaded "braking" wheel of a vehicle.

Keywords: disc-block type braking device, anti-lock system, adaptive braking, drive, design.

1. Введение

Бесконечный рост грузооборота транспортных потоков [1] заставляет задумываться о развитии систем безопасности транспортных средств, что приводит к совершенствованию и доработке существующих узлов торможения, как основных элементов активной безопасности.

Современные дисковые и дисково-колодочные тормозные устройства транспортных средств и технологических машин поражают разнообразием конструкций в зависимости от вида подвижного состава и условий эксплуатации (рис. 1). Типы приводов, используемых при эксплуатации тормозных устройств отличаются применением прижимающих элементов и рабочих тел.

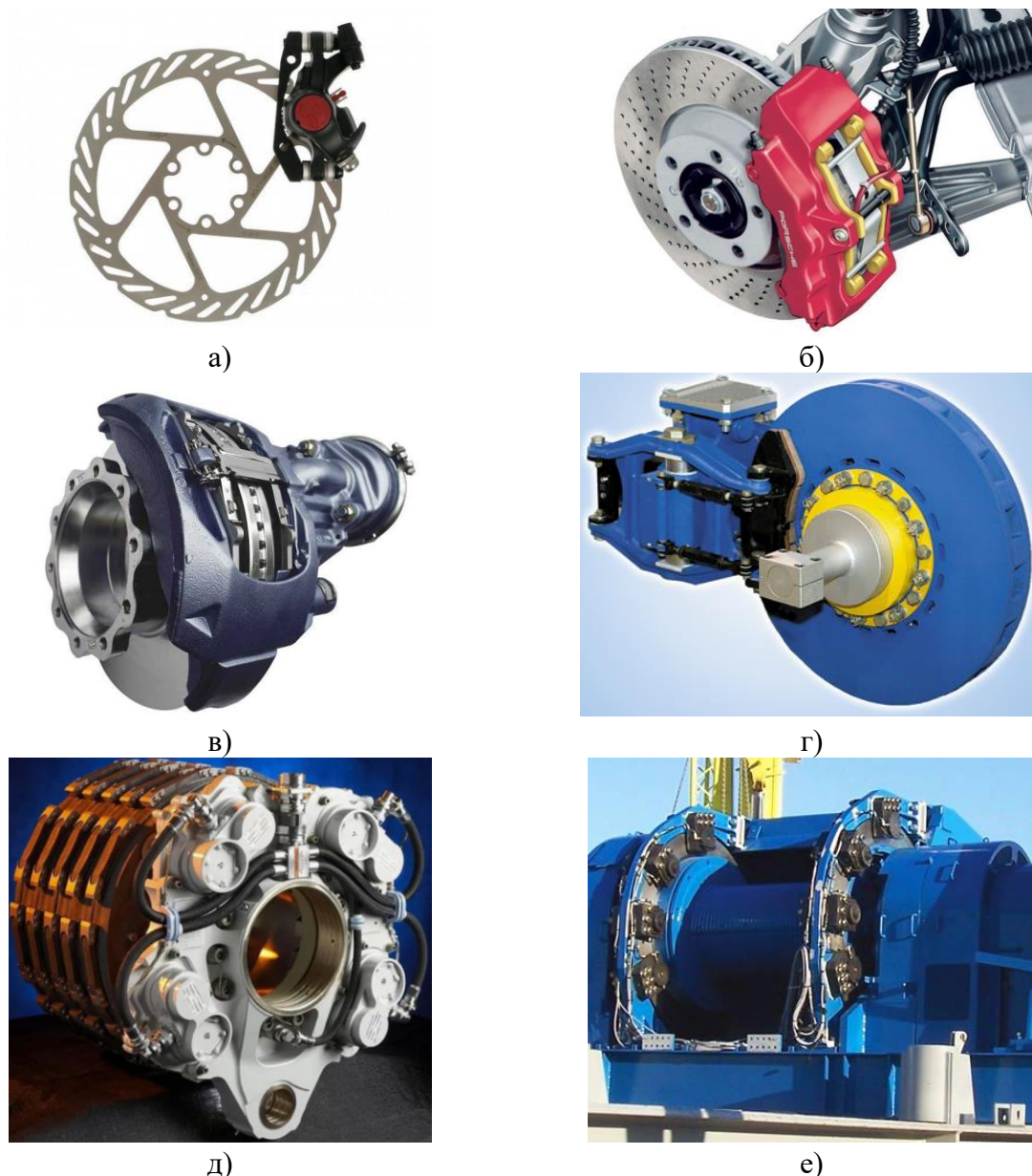


Рисунок 1. Современные дисковые и дисково-колодочные тормозные устройства транспортных средств и технологических машин: с механическим (а), гидравлическим (б) и пневматическим (в) типами привода; работающим через передаточный механизм (г), использующую полиприжимающие элементы на едином суппорте (д) и разнесенные суппорта по рабочей площади тормозного диска (е)

Условия эксплуатации и развитие следящих электронных устройств позволяют отслеживать тормозные характеристики транспортных средств и технологических машин в процессе торможения. С помощью этих систем осуществляется контроль работоспособности тормозных систем и отслеживания периода обслуживания и необходимой замены отдельных элементов. Дальнейшее развитие тормозных устройств должно быть направлено на адаптивность тормозных характеристик транспортных средств и технологических машин. Рассмотрим подробнее каждый тип тормозного устройства на предмет применимости адаптивности тормозных характеристик.

2. Анализ тормозных устройств по целесообразности разработки адаптивной системы торможения

Тормозные устройства с механическим типом привода применяются лишь на транспортных средствах малой массы. Данный тип устройств используется наравне с ручным управлением, что объяснимо малыми значениями развиваемого тормозного момента. Водитель непосредственно воздействует на рукоятку управления тормозной системой и регулирует тормозное усилие на тормозящем колесе через нажатие и расжатие органа управления. Согласно исследованиям [2], проведенными британскими учеными, современные тормозные устройства должны обеспечивать баланс между малой массой и прочностными и теплоотводящими свойствами.

Создание адаптивности лишь замедлит и усложнит процесс торможения, что доказывает бесполезность разработка адаптации и регулирования для данных транспортных средств.

В тормозных устройствах с гидравлическим и пневматическим типами привода (рис. 1 б, в) основной проблемой является неравномерность тормозных сил при длительной эксплуатации. Это объяснимо прежде всего неравномерностью износа [3, 4, 5] в результате чего проблематично управлять процессом торможения с реализацией точных значений тормозной силы.

Вопрос адаптации тормозного усилия при эксплуатации данных механизмов стоит остро, так как динамика торможения может меняться достаточно быстро в зависимости от множества факторов. Применение антиблокировочных систем позволило поставить под контроль сцепление колес с поверхностью дороги и недопущения неконтролируемого юза транспортного средства при торможении. Разработка электронных помощников антиблокировочной системы позволила контролировать сцепление колеса с дорогой согласно положению кузова транспортного средства. Системы распределения тормозных усилий (EBD) (рис. 2 а), курсовой устойчивости (ESP) (рис. 2 б), антипробуксовочная (ASR) (рис. 2 в) и ассистент экстренного торможения (Brake assist) (рис. 2 г) используют датчики антиблокировочной системы и корректируют ее работу исходя из единственного параметра времени взаимодействия.

В подвижном составе тормозные устройства дисково-колодочного типа с передаточным механизмом (рис. 1 г) эксплуатируются при длительном и кратковременном режимах торможения. Прижимающая сила значительно превышает значение нежели у конструкций устройств непосредственным воздействием прижимающих элементов на тормозные колодки. Это определяется параметрами рычажной передачи прижимающего механизма. Недостатком данной конструкции силового устройства является перемещение прижимающего механизма относительно рабочих поверхностей тормозного диска. При изменении положения кузова вагона изменяется положение прижимающего механизма относительно рабочей поверхности тормозного диска. Это в первую очередь отражается на тормозных колодках, испытывающие колоссальные изгибающие нагрузки от взаимодействия с поверхностью тормозного диска [6].

Колесные тормозные устройства, применяемые на авиационных типах транспорта, работают при длительном режиме торможения (рис. 1 д). Колесные тормозные устройства используются совместно с аэродинамическим тормозом. Использование в паре двух различных типов тормозов позволяет повысить эффективность торможения самолета. В колесных тормозах дисково-колодочного типа, по аналогии антиблокировочной системы в автомобилях, в самолетах используется

автомат торможения, исключая юз. Основной проблемой колесных тормозных устройств является локальный перегрев из-за многодисковости тормозов [7, 8].

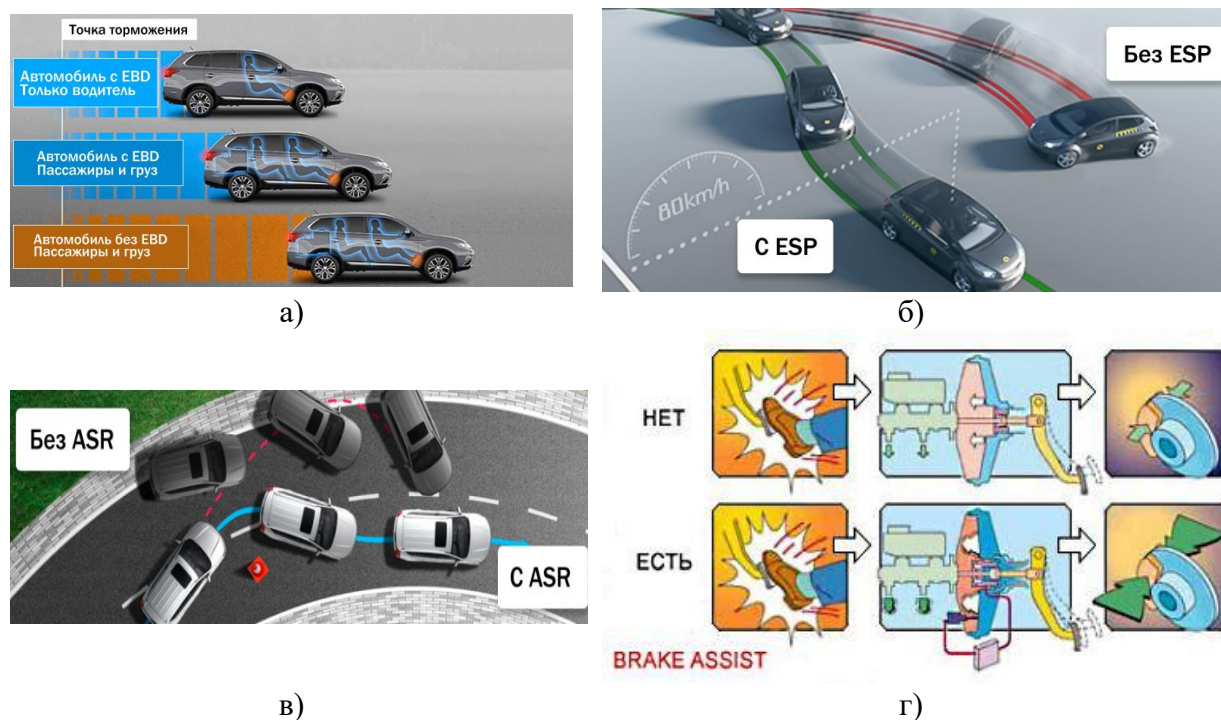


Рисунок 2. Системы распределения тормозных усилий (EBD) (а), курсовой устойчивости (ESP) (б), антипробуксовочная (ASR) (в) и ассистент экстренного торможения (Brake assist) (г)

Адаптивность торможения для тормозных устройств, устанавливаемых на пассажирских самолетах, не играет особой роли, потому как компенсируется автоматом торможения и применением других типов торможения.

Тормозные устройства, применяемые на шахтных подъемниках и буровых установках (рис. 1 е), используются совместно с электромагнитным тормозом, установленном на электроприводе. Целесообразность адаптивности торможения для шахтных подъемников и буровых установок не имеет смысла, так как задача фрикционных тормозных устройств окончательная остановка, тогда как основное тормозное усилие реализуется электромагнитным тормозом. Основное направление исследований для тормозных устройств, применяемых на подъемно-транспортном оборудовании, связано с реализацией стабильности тормозных характеристик [9].

Подводя итоги по анализу литературных источников можно с уверенностью утверждать, что адаптивное торможение необходимо тормозным устройствам, которые используются как основные элементы систем активной безопасности. В данном случае необходимо проектировать системы активной безопасности транспортных средств, направленные на отслеживание и управление тормозными характеристиками тормозных устройств по нескольким параметрам. Наиболее актуальными могут быть исследования связанные с доработкой существующих систем безопасности и универсальностью применения на различных типах транспорта. Для тормозных устройств, устанавливаемых на автотранспортных средствах, системы активной безопасности могут учитывать не только время взаимодействия как при использовании

антиблокировочных систем и возможных программных продуктов-ассистентов, но как нормальную нагрузку воспринимаемую тормозящим колесом, так и развиваемый тормозной момент [10].

Реализация адаптивности представлена на схеме работы тормозного устройства дисково-колодочного типа с пневматическим типом привода (рис. 3 а, б). На схемах показано расгруженное (рис. 3 а) и нагруженное (рис. 3 б) «тормозящее» колесо в процессе торможения.

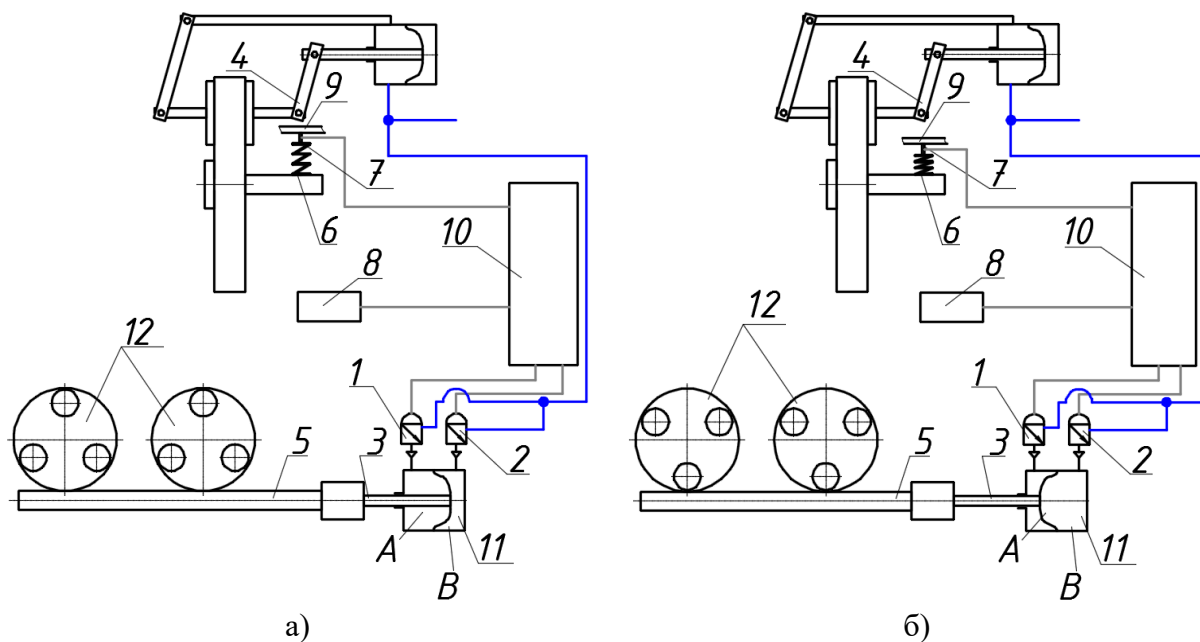


Рисунок 3. Схема работы привода регулирующего механизма тормозного устройства дисково-колодочного типа

Используя два положительных распределителя с центральным управлением 1, 2, можно управлять возвратно-поступательным движением штока механизма регулировки 3 тормозного устройства 4. Первый положительный распределитель 1 управляет подачей воздуха в полость А, воздействуя на поршень штока регулирующего механизма и заставляя перемещаться вперед рейку 5. В результате чего шестерни 12 проворачиваются и прижимающие элементы, закрепленные на них смещаются относительно их осей вращения. Сигнал получаем от датчика давления 6, установленного на подвески 7 транспортного средства и инклинометра 8, закрепленного на раме 9. При увеличении колебаний кузова на одном из колес оси, в случае нажатия на педаль тормоза первый распределитель 1 получает питание от управляющего процессора 10 и открывает подачу рабочего тела в полость А пневмокамеры 11 регулирующего механизма тормозного устройства. После достижения рейки 5 крайнего положения распределитель 1 закрывает подачу рабочего тела, в результате воздух под давлением препятствует возврату рейки 5 в исходное положение.

Второй распределитель 2 необходим для возврата рейки в исходное положение. Для этого сигнал с датчиков давления 6 и инклинометра 8 обрабатывается процессором 9 и дает управляющий сигнал на второй положительный распределитель 2 регулирующего механизма. Давление с рабочей магистрали тормоза через открытый

клапан распределителя 2 попадает в полость Б, тогда как первый распределитель 1 полости А открывает клапан и выпускает давление из этой полости в атмосферу. После достижения крайнего положения рейки 5 полость Б запирается клапаном второго распределителя 2 и не дает возможность изменять положение рейки 5 в течении движения транспортного средства.

3. Заключение

Проанализированы конструктивные решения тормозных устройств дисково-колодочного типа, применяемые на различных видах транспорта и технологических машин, на основе необходимости адаптивности. В результате анализа были намечены пути дальнейших исследований по целесообразности разработки адаптивных систем торможения транспортных средств. Основным условием является многовекторность отслеживания параметров отвечающих за приспособленность тормозных устройств к изменяющимся внешним условиям. В качестве параметров отвечающих за адаптивность тормозных устройств, наравне с существующими антиблокировочными системами и программами-ассистентами необходимо применять дополнительные системы обеспечивающие связь между нагрузкой, приходящейся на «тормозящее» колесо и развиваемым этим колесом тормозным моментом. Предложена схема работы адаптивной системы торможения на примере нагруженного и разгруженного «тормозящего» колеса транспортного средства.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Проблемы взаимодействия различных видов пассажирского транспорта в городе / Т. Н. Коновалова, С. Л. Надирян, Ю. П. Миронова, [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2015. – № 12. – С. 133-139.
2. Naveed, N., Whitford, M. (2019) Design analysis of bicycle brake disc for carbon fibre-lightweight material. The International Journal of Integrated Engineering. – 2019. vol. 11(8). pp. 91-109 DOI: <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.08.010>
3. Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake / Zhang S., Hao Q., Liu Y., [et al.] // Mathematical Problems in Engineering. – 2019, 15p. <https://doi.org/10.1155/2019/6250694>
4. Sugözü, İ., Sugözü, B. The effect of wearing brake lining surface on braking performance // Journal of Current Research on Engineering, Science and Technology. – 2021. vol. 7 (2), pp. 203-208. doi: 10.26579/jocrest.82
5. Analysis of the wear and friction of brake pad added cashew and ulexite using ANSYS/ M. A. Akar, İ. Sugözü, G. Bilgi., [et al.] // International Journal of Automotive Engineering and Technologies. – 2021. vol. 12(3). pp. 83-91
6. Яицков, И. А., Поляков, П. А. Влияние продольной динамики пассажирского вагона на его тормозные свойства // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(88). – С. 75-88. – DOI 10.46973/0201-727X2022475.
7. Calculation of the braking temperature on a brake disc of light passenger aircraft using FEM and Newcomb models / M. Djafri, M. Bouchetara, T. Khatir, [et al.] // International Journal of Computational Methods. 2021. vol. 18. № 5. p. 14 <https://doi.org/10.1142/S0219876220400022>
8. Experimental identification of the thermal parameters of an aircraft braking system during the braking phase / J.-G. Bauzin, N. Keruzore, N. Laraqi, [et al.] // Advances in

thermal science and energy. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2023. pp. 83-92. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43934-6_9.

9. Wang, D., Wang, R., Zhang, J. Dynamic brake characteristics of disc brake during emergency braking of the kilometer deep coal mine hoist // *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. vol.12(5). 23p. doi:10.1177/1687814020918097

10. Предпосылки создания адаптивной системы торможения транспортных средств / И. А. Яицков, П. А. Поляков, Ю. Д. Шевцов [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – № 11. – С. 585-593. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-11-585-589.

Поступила в редколлегию 07.02.2024 г.

УДК 621.793.71

F. I. Panteleenko, a member- correspondent. NAN B, Ph. D., Professor, **V. A. Okovity**, Ph. D., **O. G. Devoino**, Ph. D., Professor, **T. I. Bendik**, Ph. D., **V. V. Okovity**, **A. A. Litvinko**, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Tel. / Fax +375 17 293-95-99, niil_svarka@bntu.by

V. M. Astashinsky, a member- correspondent. NAS B, D. Phys. - math. n., prof.

A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Tel. / Fax +375 17 284-24-91, ast@hmti.ac.by

PROPERTIES OF MULTILAYER PLASMA COATINGS FROM MATERIALS BASED ON M-CROLL

The article describes the structures and properties of m-croll plasma powder coatings deposited under optimal conditions. Most of the modern nickel-based alloys used in technology used to form plasma coatings contain 6-12% aluminum, 20-30% chromium, and 0.15-1.0% reactive element (yttrium, tantalum, etc.). With an increase in the concentration of the reactive element, the production of new oxide grains during deposition inside the film itself is inhibited and, in the presence of more than 0.82% yttrium, it completely stops, and the rate increases with oxygen diffusion. This is caused by a significant refinement of the oxide film and alloy grains and the formation of yttrium-rich phases - Ni_5Y , Ni_9Y , $\text{Ni}_3\text{Al}_2\text{Y}$, $(\text{NiCo})_{4.25}\text{Al}_{0.15}\text{Y}$, which have low resistance to high-temperature oxidation. All this should be taken into account during the formation of the coating when optimizing the content of rare earth (REM) metals in the alloy. Consequently, the introduction of reactive elements into the plasma coating contributes to the absence of stresses in the film caused by internal oxidation. However, an increase in the concentration of the reactive element is limited by an increase in the oxygen diffusion rate and the processes of alloy embrittlement. Therefore, most NiCrAlYTa alloys for sputtering are limited in oxygen content to 0.05%. The mechanical properties of alloys are significantly improved when they are alloyed with tantalum, niobium, and titanium, since in their presence a superlattice of the β -phase (Ni_2AlTa , Ni_2AlNb) is formed due to the ordering of elements in the aluminum sublattice. However, the formation of such a superlattice requires a concentration of elements that exceeds a certain limit. Niobium has a positive effect on the heat resistance of the NiCrAl alloy, but reduces its corrosion resistance. Tantalum has the most favorable effect on both the mechanical and protective properties of MCrAl alloys. In addition to participating in the formation of the β -phase superlattice, tantalum increases heat resistance and resistance to high-temperature salt corrosion of grain boundaries, segregating primarily in the alloy regions, and also binds free carbon into carbides. All refractory elements form inclusions, which in most cases reduce the diffusion mobility of atoms in the coating. High-quality wear-resistant coatings based on titanium dioxide - aluminum oxide and nickel-chromium-aluminum-yttrium-tantalum alloy must be formed from materials with strictly defined sizes and morphology of the particles of the initial powder, with a chemical and phase composition uniform over the cross section of the initial powders and a minimum grain size of phase inclusions.

Keywords plasma spraying processes, powder compositions, plasma spraying in air, nickel-based metal alloys, oxide ceramics, performance characteristics, morphology and structure.

Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, Т. И. Бендик, В. В. Оковитый, А. А. Литвинко, В. М. Асташинский

СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ М-КРОЛЕЙ

В статье описаны структуры и свойств напыленных при оптимальных режимах плазменных порошковых покрытий из м-кроллей. Большинство современных используемых в технике сплавов на основе никеля применяющихся для формирования плазменных покрытий, содержат 6-12 % алюминия, 20-30 % хрома, а также 0,15-1,0 % реактивного элемента (иттрия, тантала и др.). При увеличении концентраций у реактивного элемента получение новых зерен оксидов при напылении внутри самой пленки тормозится и при наличии иттрия более 0,82 % полностью останавливается, увеличивается скорость при диффузии кислорода. Это вызвано значительным измельчением оксидной пленки и зерна сплава и образованием богатых иттрием фаз - Ni_5Y , Ni_9Y , $\text{Ni}_3\text{Al}_2\text{Y}$, $(\text{NiCo})_{4.25}\text{Al}_{0.15}\text{Y}$, обладающих низкой стойкостью к высокотемпературному окислению. Все это должно учитываться во время формирования покрытия при

© Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Bendik T. I., Okovity V. V., Litvinko A. A., Astashinsky V. M.; 2024

оптимизации содержания редкоземельных (РЗМ) металлов в сплаве. Следовательно, введения реактивных элементов в плазменное покрытие способствует отсутствию напряжений в пленке, вызываемых внутренним окислением. Тем не менее, увеличение концентрации реактивного элемента ограничено ростом скорости диффузии кислорода и процессами охрупчивания сплава. Поэтому большинство NiCrAlYTa сплавов для напыления имеют ограничения по содержанию кислорода до 0,05 %. Механические свойства сплавов значительно улучшаются при легировании их танталом, ниобием, титаном, так как в их присутствии образуется сверхрешетка β -фазы (Ni_2AlTa , Ni_2AlNb) благодаря упорядочению элементов в алюминиевой подрешетке. Однако, для образования такой сверхрешетки необходима концентрация элементов, превышающая некоторую предельную. Ниобий оказывает положительное влияние на жаростойкость сплава NiCrAl , но снижает его коррозионную стойкость. Наиболее благоприятное влияние как на механические, так и на защитные свойства сплавов MCrAl оказывает тантал. В дополнение к участию в образовании сверхрешетки β -фазы, тантал увеличивает жаростойкость и стойкость к высокотемпературной солевой коррозии границ зерен, сегрегируя прежде всего в областях сплава, а также связывает свободный углерод в карбиды. Все тугоплавкие элементы образуют включения, которые в большинстве случаев снижают диффузионную подвижность атомов в покрытии. Качественные износостойкие покрытия на основе диоксида титана - оксид алюминия и никель-хром-алюминий-итрий-танталового сплава необходимо формировать из материалов при строго определенных размерах и морфологии частиц у исходного порошка, с равномерным по сечению исходных порошков химическим и фазовым составом и минимальным размером зерна фазовых включений.

Ключевые слова: процессы плазменного напыления, порошковые композиции, плазменное напыление на воздухе, металлические сплавы на основе никеля, оксидная керамика, эксплуатационные характеристики, морфология и структура.

1. Introduction

Almost all oxide powder materials used for deposition of wear-resistant plasma coatings have a fairly high melting point. The main properties of these materials include their low electrical and thermal conductivity characteristics. The vast majority of oxides are characterized by high hardness and the ability to resist wear. They can also be used as electrical insulating, heat-shielding, decorative, corrosion-resistant. Due to the low-cost factor of the used powders of industrial oxide materials and their versatility, they contribute to the widespread introduction of sprayed wear-resistant coatings based on them [1–7]. Probably the most common disadvantage as a result of the process of plasma spraying of oxide materials is the partial delamination of the formed coatings, as a rule, if the values of the thermal expansion coefficients of the product sprayed by the plasma and the oxide powder coating do not match [8]. To significantly improve the quality characteristics of oxide plasma powder coatings (porosity, cohesive and adhesive strength, plasticity), plastic components based on metallide-type alloys are added to them, for example, NiAl , NiCr and NiCrAlY powder compositions. To significantly increase the antifriction properties of ceramic powder plasma coatings under operating conditions at high temperatures, it is necessary to introduce a nickel-chromium-aluminum-yttrium-tantalum composition into the composition of the powders [9–11]. During the last decades, M-rabbit coatings (MeCrAlY , where Me is Ni, Co, Fe) have been studied as oxidation/corrosion resistant coatings, and the MeCrAlY alloy has been used not only as a separate coating, but also as a bond coating for plasma thermal barrier coatings (TBC). Due to their excellent strength properties, high hardness, low density, oxides are widely used as a matrix for plasma-sprayed composite coatings. In the present study, NiCrAlYTa /oxide ceramic composite plasma coatings will be obtained by air sputtering. Formed plasma coatings based on the titanium dioxide-aluminum oxide-nickel-chromium-aluminum-yttrium-tantalum powder composition have increased temperature and impact resistance, ductility, structure homogeneity, and minimal total porosity in comparison with the titanium dioxide-oxide powder system. aluminum [12]. The main feature of nickel-chromium-aluminum-yttrium-tantalum powder material is the ability to plastically relax stresses during deposition. The reason for their occurrence is an inconsistent change in the volumes during heating and cooling of the ceramic coating and the materials of the sprayed

base of the part. As a result of high-temperature oxidation during operation, the plasticity of the metal base of the product deteriorates significantly, while the layer of ceramic formed during deposition is permeable to gases, so it is necessary to add a material with impact strength and high heat-resistance characteristics to ceramics.

2. Study of the structure and properties of plasma-sprayed ceramic powder coatings under optimal conditions

Figure 1 shows the appearance of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlYTaNi}$ coating applied by plasma spraying. It can be seen from the figure that the coating has a good density and no surface defects such as cracks are visible. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ceramic aggregates are bound to each other, and some of the large-sized ceramic particles are embedded in the molten NiCrAlYTaNi coatings. Such microstructural characteristics are associated with the mobility of molten liquid-phase NiCrAlYTaNi components, which can fill the gaps and cracks that occur during the plasma deposition of an oxide coating and improve the coating density. Figure 2 shows the microstructures of composite coatings $\text{NiCrAlYTaNi} / \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlYTaNi}$ wt.%. Analysis of the microstructures shows that the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ceramic phase looks dark gray, while the NiCrAlYTaNi phase looks light gray. It can be seen from the microstructure that the composite coatings are dense and uniform, pores can be observed, while the quality of the intercontact contacts is good for all coatings. It can also be seen that NiCrAlYTaNi is present in the coatings in the form of thin plates. As shown in Figure 2, particle structures are the result of remelted or non-melted feedstock particles. Lamellar microstructures indicate that the sprayed droplets have not yet solidified before impact, impacting the substrate or previously deposited layers at high speed. The degree of particle melting largely determines the porosity, microhardness, and subsequent properties of the coating. It is noticeable that a mutually displaced structural grid is present at the substrate-coating boundary.

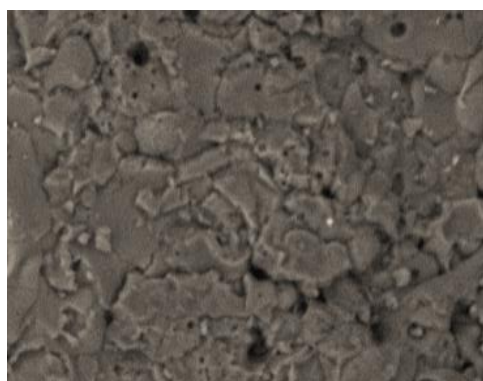


Figure 1. Images of the surface areas of the formed wear-resistant coating from $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlYTaNi}$ powder material ($\times 1000$)

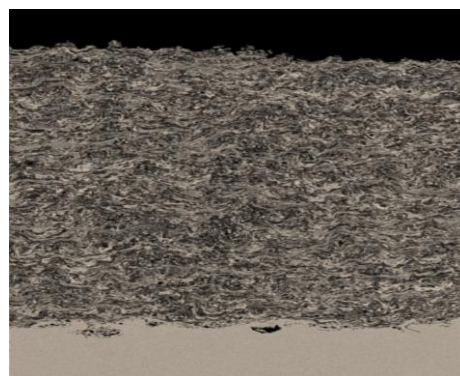


Figure 2. Microstructure of the cross-section of the deposited composite coatings $\text{NiCrAlYTaNi} / \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ($\times 500$)

Figure 2 shows the microstructures of composite coatings $\text{NiCrAlYTaNi} / \text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlYTaNi}$ wt.%. Analysis of the microstructures shows that the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ ceramic phase looks dark gray, while the NiCrAlYTaNi phase looks light gray. It can be seen from the microstructure that the composite coatings are dense and uniform, pores can be observed, while the quality of the intercontact contacts is good for all coatings. It can also be seen that NiCrAlYTaNi is present in the coatings in the form of thin plates. As shown in Figure 2, particle structures are the result of remelted or non-melted feedstock particles. Lamellar microstructures indicate that the sprayed droplets have not yet solidified before impact, impacting the substrate or previously

deposited layers at high speed. The degree of particle melting largely determines the porosity, microhardness, and subsequent properties of the coating. It is noticeable that a mutually displaced structural network is present at the substrate-coating boundary.

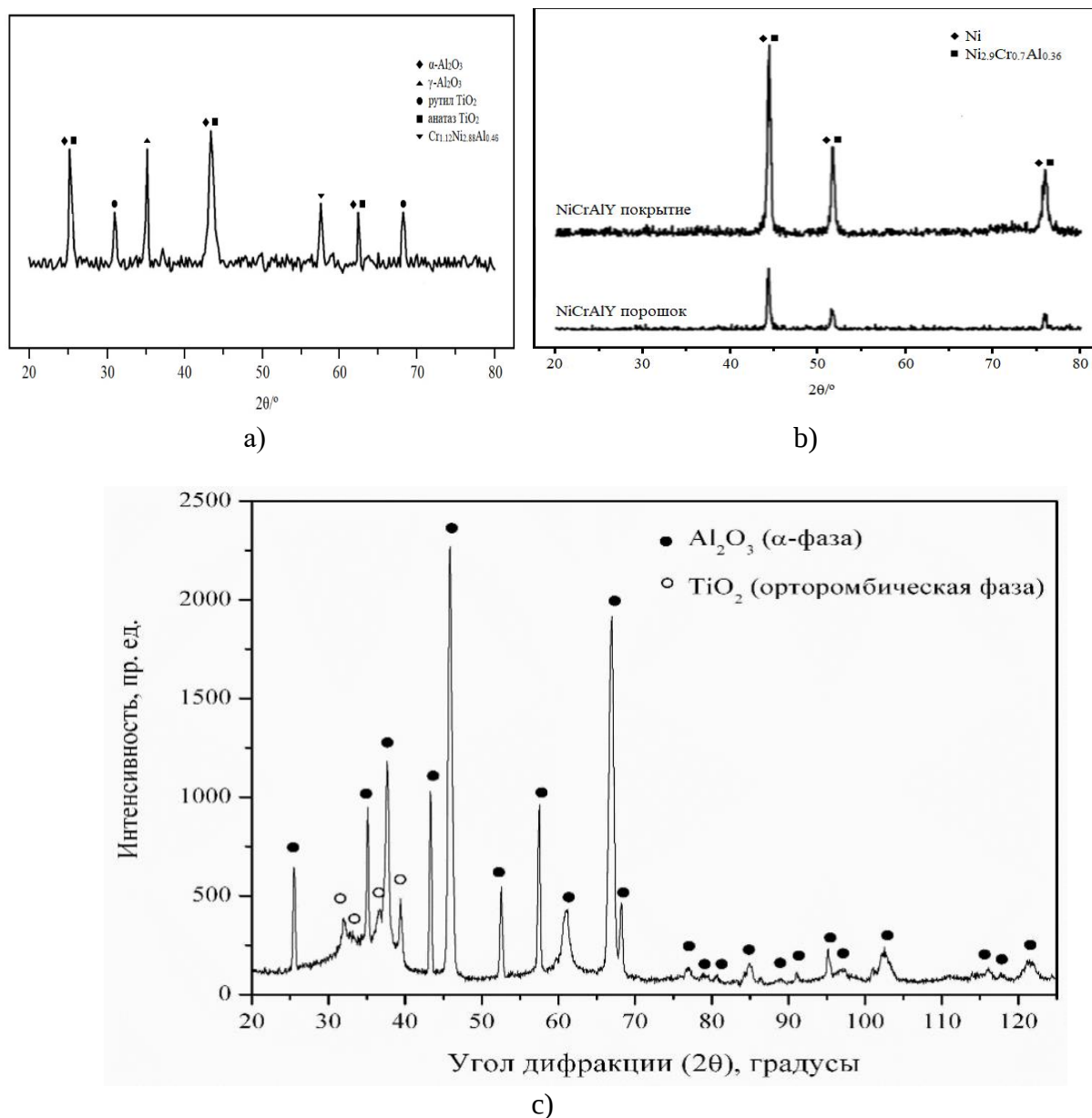


Figure 3. X-ray pattern of the coating: a- NiCrAlYTa-Al₂O₃-TiO₂; b NiCrAlY; c- Al₂O₃-TiO₂

It can be seen from the obtained Al₂O₃-TiO₂-NiCrAlYTa structure that the thickness of the formed coating layer is approximately 50 μ m. Its elemental analysis confirmed the presence of aluminum, oxygen, yttrium, tantalum, nickel in it with a uniform distribution along the entire thickness of the layer of these. For comparison, Figure 3b shows the X-ray diffraction patterns of the NiCrAlY powders and the plasma-sprayed NiCrAlY coating. It can be seen from the figure that NiCrAlY contains mainly homogeneous Ni crystals and the composite phase Ni_{2.9}Cr_{0.7}Al_{0.36}; after plasma deposition, a new crystalline phase is not formed, and the intensity of the diffraction peak of all crystalline phases increases significantly, which indicates

that that, as the sputtering process continues, the crystallinity of the NiCrAlY powders increases somewhat due to the high-temperature melting effects. Table 2 shows the calculated contents of homogeneous Ni and Ni_{2.9}Cr_{0.7}Al_{0.36} crystals in the NiCrAlY phase. This shows that the Ni_{2.9}Cr_{0.7}Al_{0.36} composite phase occupies most of the system. After plasma spraying, the content of the homogeneous Ni crystalline phase decreases, while the content of Ni_{2.9}Cr_{0.7}Al_{0.36} increases, indicating that the spraying process is favorable for the crystallinity of the internal elements in the system. The conclusion is consistent with the intensity trend of the diffraction peak. The elemental composition of the resulting two-layer composite plasma coatings based on Al₂O₃ and TiO₂ oxides was studied using the energy-dispersive X-ray spectral microanalysis. The obtained elemental composition of the formed protective coatings is given in Table 3. Using the obtained spectra of characteristic X-rays, when recorded on layers with a thickness of about 1–2 μm, a detailed analysis of the obtained elemental composition was carried out from the surface. The upper layer of the formed wear-resistant coating contains approximately 67.2% oxygen atomic fractions and 32.0% aluminum atomic fractions, which exceeds the stoichiometry of aluminum oxide. The resulting coating in the form of TiO₂ - titanium oxide contains an excess fraction of atoms and about 0.6% atomic fractions of titanium, due to the presence of impurities in the source material of the powder in the surface layer, there are 0.2% atomic fractions of silicon. Figure 4 shows the resulting structure of the surface layer of the plasma coating on a transverse section. It can be seen from the given data that in the initial state, the near-surface layer of the formed coating is characterized by a large number of defects - pores, splits, microcracks, propagating in different directions deep into and along the surface.

Table 1. The content of phases in the NiCrAlY- Al₂O₃-TiO₂ coating after plasma spraying

Phase components	α -Al ₂ O ₃	γ -Al ₂ O ₃	rutile TiO ₂	anatase (TiO ₂)	Cr _{1,12} Ni _{2,88} Al _{0,46}
Components, %	30,4	6,6	15,4	32,2	15,4

Table 2. Content of phases in NiCrAlY powder and coating

Components	Ni, % conten	Ni _{2,9} Cr _{0,7} Al _{0,36} , % conten
NiCrAlY powder	14,37	83,21
NiCrAlY coating	11,42	87,53

Table 3. Formed elemental composition in the initial state (obtained coating)

Elements Present	Percent Concentration	
	in weight fractions	in atomic fractions
aluminum	43,7	32,0
titanium	1,4	0,6
silicon	0,4	0,2
oxygen	54,5	67,2

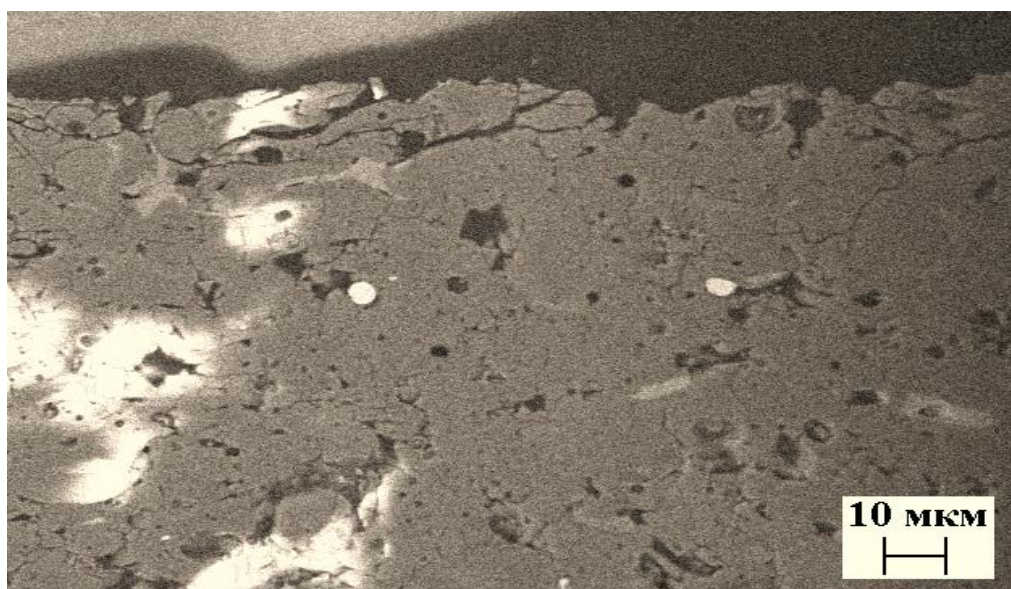


Figure 4. The resulting structure of the surface layer of the plasma coating (transverse section)

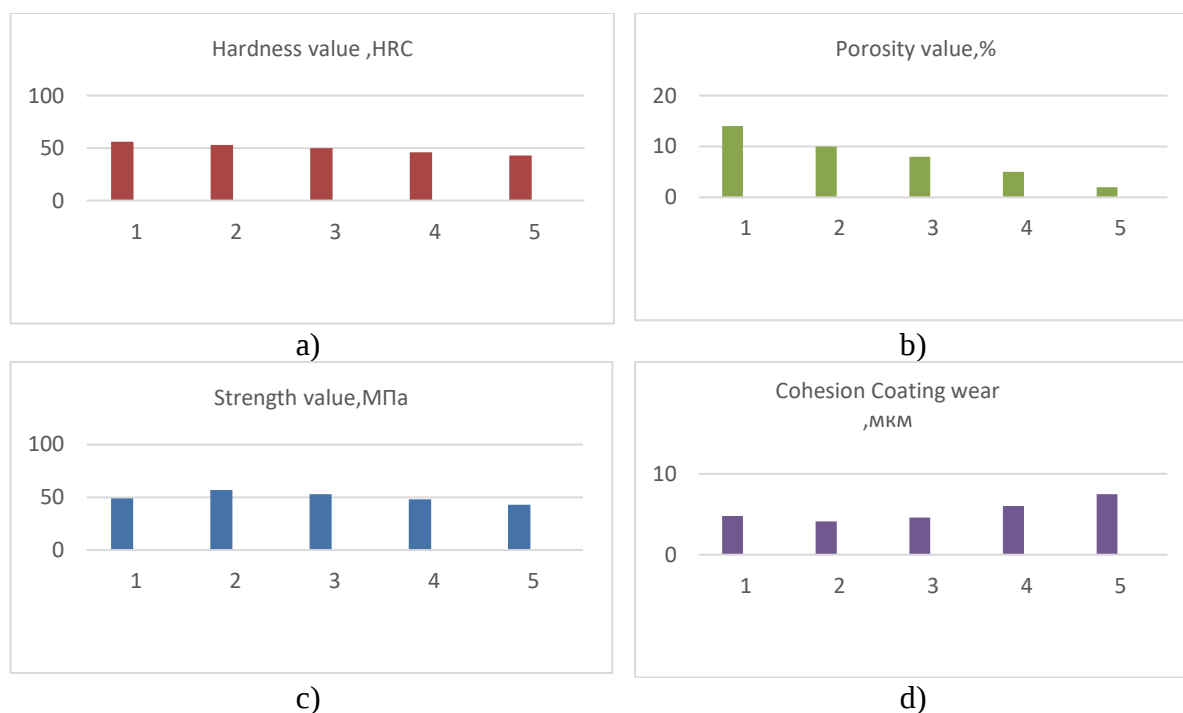


Figure 5. Characteristics of sprayed wear-resistant coatings: a - hardness; b - porousness; c - adhesion strength; g - wear resistance (1-70 % Al_2O_3 - TiO_2 – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; 2 – 60 % Al_2O_3 - TiO_2 – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; 3-50 % Al_2O_3 - TiO_2 – 50% Ni-Cr-Al-Y-Ta; 4-40 % Al_2O_3 - TiO_2 – 60 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; 5-30 % Al_2O_3 - TiO_2 – 70 % Ni-Cr-Al-Y-Ta)

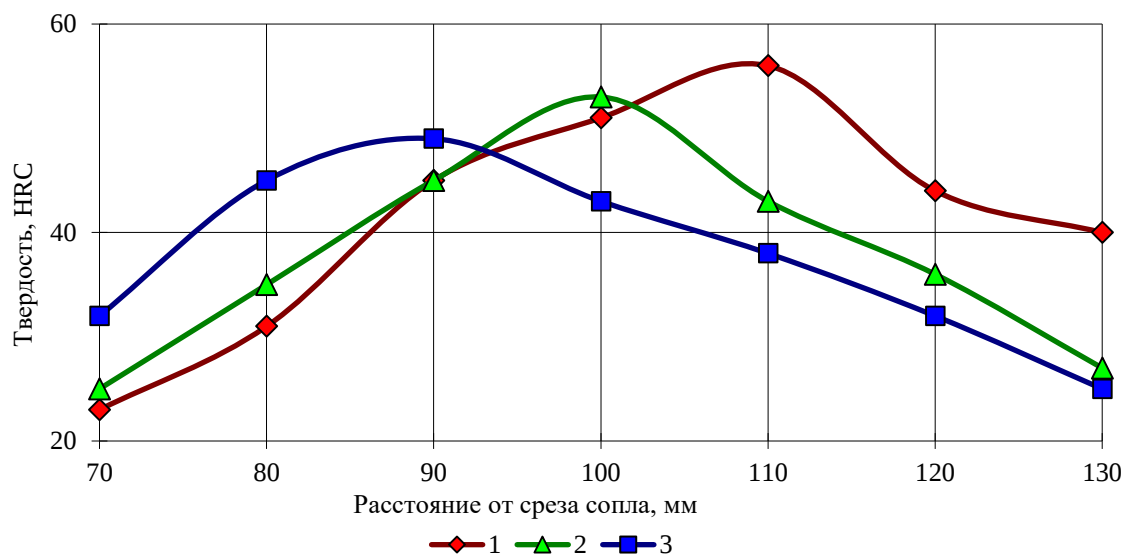


Figure 6. Dependence of hardness (HRC) on the distance from the surface to the cut of the plasma torch nozzle during spraying, mm for powders NiCrAlITa- Al_2O_3 - TiO_2 (1 – 70 % Al_2O_3 - TiO_2 – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; 2 – 60 % Al_2O_3 - TiO_2 – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; 3 – 50 % Al_2O_3 - TiO_2 – 50 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; fraction 40...63 μm , $I=500$ A, $R_N=45$ l/min, $R_{\text{por}}=4.5$ kg/h)

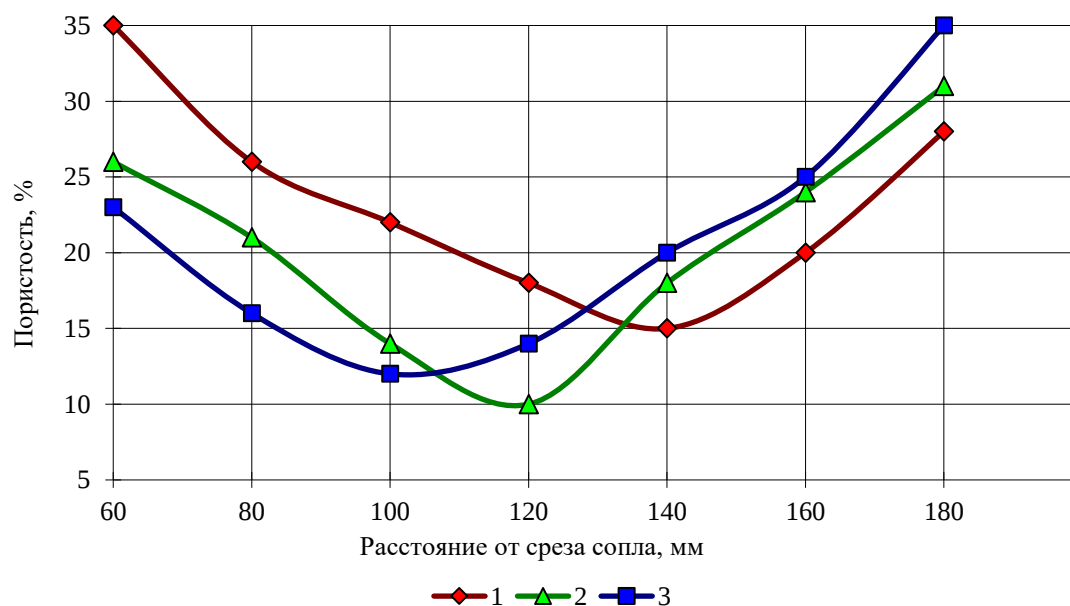


Figure 7. Dependence of porosity (%) on the distance from the surface to the cut of the plasma torch nozzle during spraying, mm for powders NiCrAlITa- Al_2O_3 - TiO_2 (1 – 70 % Al_2O_3 - TiO_2 – 30 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; 2 – 60 % Al_2O_3 - TiO_2 – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; 3 – 50 % Al_2O_3 - TiO_2 – 50 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; fraction 40...63 μm , $I=500$ A, $R_N=45$ l/min, $R_{\text{por}}=4.5$ kg/h)

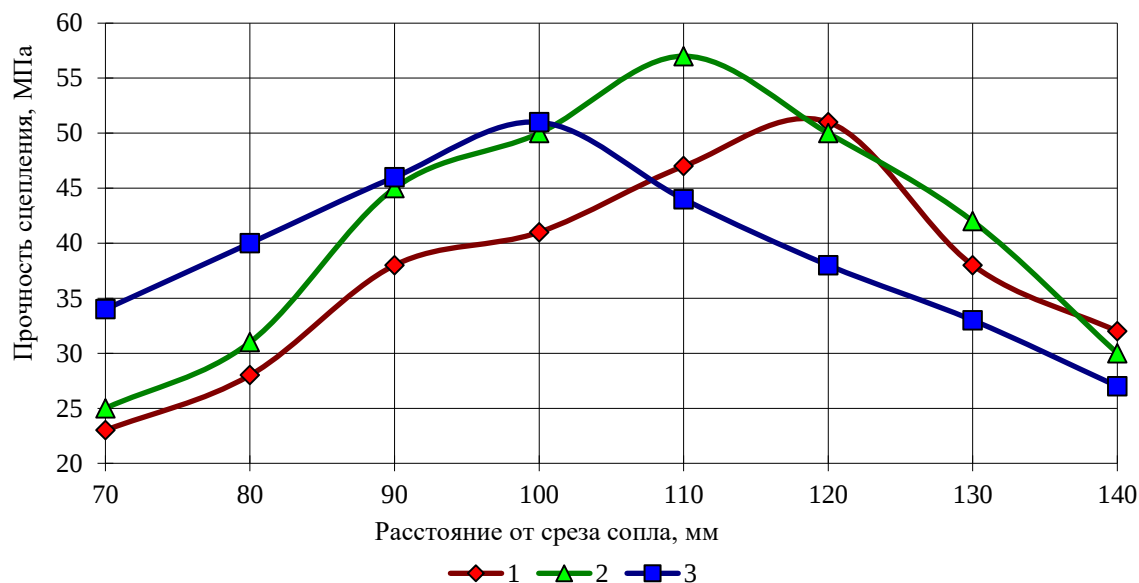


Figure 8. Dependence of the adhesion strength (%) on the distance from the surface to the cut of the plasma torch nozzle during spraying, mm for powders NiCrAlITa- Al_2O_3 - TiO_2 (1 – 70 % Al_2O_3 - TiO_2 - 30% Ni-Cr-Al-Y-Ta; 2 – 60 % Al_2O_3 - TiO_2 – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; 3 – 50 % Al_2O_3 - TiO_2 – 50 % Ni-Cr-Al-Y-Ta; fraction 40...63 μm , $I=500$ A, $R_N=45$ l/min, $R_{\text{por}}=4.5$ kg/h)

The phase composition of plasma coatings based on powders of aluminum and titanium oxides was studied using X-ray diffraction analysis on a diffractometer. The depth of the layer under consideration, depending on the applied diffraction angle, was on the order of 10–50 μm . The main phases in the coating after plasma spraying are alumina α - Al_2O_3 and the orthorhombic phase of titanium oxide TiO_2 , as shown in the X-ray diffraction pattern shown in Figure 3c. The influence of the spraying distance on the performance characteristics of plasma wear-resistant coatings obtained at optimal spraying conditions are shown in Figures 5, and the values of performance characteristics are shown in Figure 6-8.

3. Conclusion

The structures and properties of Al_2O_3 - TiO_2 -NiCrAlYTа plasma-sprayed powder coatings deposited under optimal conditions are studied. The coating has a good density, a minimum number of surface defects such as pores and cracks. Al_2O_3 - TiO_2 ceramic aggregates are bound to each other, and some of the large-sized ceramic particles are embedded in the molten NiCrAlYTа coatings. Such microstructural characteristics are associated with the mobility of molten liquid-phase NiCrAlYTа components, which can fill the gaps and cracks that occur during the plasma deposition of an oxide coating and improve the coating density. The interface is not well defined, indicating that during the high temperature deposition process, the ceramic constituents of the coating are melted into an organic whole with the metallic constituent at the interface, and that the elements of the two constituents diffuse and penetrate each other, there are no obvious boundaries between layered structures. In addition to chemical and mechanical bonds, there are some metallurgical bonds. At the specified values of technological parameters, a microheterogeneous structure of the sprayed coating is formed, containing elements that ensure its wear resistance (Cr1.12Ni2.88, α - Al_2O_3 , γ - Al_2O_3 , orthorhombic phase of titanium oxide TiO_2). In this case, the spreading of molten particles on the substrate is achieved, there is

no spattering and no loss during collision with the substrate. The main crystalline phases in the coating system are γ -Al₂O₃, anatase (TiO₂), Cr_{1.12}Ni_{2.88} phase, in addition to α -Al₂O₃ and rutile TiO₂. Rutile TiO₂ diffraction peaks are found around $2\theta=32^\circ$ and $2\theta=70^\circ$, its content increases after sputtering, which indicates that the transition from the anatase phase to the rutile TiO₂ phase occurs at high temperature. According to the results of quantitative analysis, the content of α -Al₂O₃ and rutile TiO₂ is 30.4% and 32.2%, respectively; they constitute the main phase structures of high-temperature ceramic coatings. The influence of the plasma spraying distance on the adhesion strength, hardness and porosity of the obtained coatings has been studied. At optimal conditions, the performance characteristics are as follows: hardness - 52-56 HRC; porosity - 7-9%; coating wear (friction with lubrication) - 4.1-4.6 microns; adhesion strength - 52-57 MPa.

LITERATURE:

1. Receipt and study of elements of screen anti-meteor protection based on multilayer composite plasma coatings NiAl-Al₂O₃ / V. M. Astashinsky [et al.] // 15th Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Proceedings of the International Forum, Minsk, May 23-26, 2016 / ITMO; editor: O. G. Penyazkov. - Minsk, 2016. - S. 40-44.
2. Formation of gas-thermal coatings: theory and practice / A. F. Ilyushchenko [i dr.]. - Minsk: Besprint, 2002. - 480 p.
3. Heat-shielding coatings based on ZrO₂ / A. F. Ilyushchenko [i dr.]. - Minsk: Re-mika, 1998. - 128 p.
4. Dostanko, A. P. Processes of plasma coating: theory and practice / A. P. Dostanko, A.F. Ilyushchenko, S. P. Kundas. - Minsk.: Armita - Marketing, Management, 1999. - 436 p.
5. Ivashko, V. S. Modern technologies for applying heat-shielding ceramic coatings / V. S. Ivashko, A. F. Ilyushchenko, V. A. Okovity // Proceedings of the Belarusian Engineering Academy. - 1997. No. 2(4). - S. 28-32.
6. Technological features of the formation of heat-shielding coatings based on zirconium dioxide / V. V. Okovity [i dr.]. // Science and technology, BNTU. - 2016. - Issue. 3. - S.193-199.
7. Formation and study of multilayer composite oxide plasma coatings on elements of screen anti-meteor protection / V. A. Okovity [and others] // Science and technology, BNTU. - 2016. - Issue. 4. - S. 270-276.
8. Development of technology for applying plasma composite coatings based on zirconium dioxide for spacecraft systems / F. I. Panteleenko [et al.] // Science and technology, BNTU. - Minsk, 2015. - Issue. 3. - S.5-9.
9. Liang Zhou. Microwave dielectric properties of low-energy plasma-coated NiCrAlY / Al₂O₃ composite /Liang Zhou Wancheng Zhou, Fa Luo, Jinbu Su, Dongmei Zhu, Yanli //Dong Surf. Coat. Technol.-2015.- P. 69-85.
10. Nicola Bowler, IEEE Trans. Dielectr. electr. Insul. 13.-2006. - P. 703-707.
11. G. Bolelli. Thermal protective properties of the gradient ceramic coating NiCrAlY / Al₂O₃ are made by plasma spraying and spraying of a suspension/ G. Bolelli, A. Candelini//Wear 344-345.-2015. P. 69–85.
12. Tolpygo, V. K. Surface rumpling of a (Ni, Pt) Al bond coat induced by cyclic oxidation / V. K. Tolpygo, D. R. Clarke // Acta Mater. - 2000. - No. 48. -P. 3283–3293.

Поступила в редколлегию 02.02.2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Баранов А. В., Воронцов А. А., Шереметьев А. Е. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬЮ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	3
Лахин А. М. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗУБООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ МЕХАНИЗМА ГИТАРЫ ДЕЛЕНИЯ.....	9
Михайлов А. Н., Котляров С. Б., Котляров В. Б., Котляров Б. С. БЕЗСТРУЖЕЧНАЯ ДОВОДКА ОТВЕРСТИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ ПРИ ПОВЫШЕНИИ ЧИСТОТЫ ПОВЕРХНОСТИ.....	15
Михайлов Д. А., Михайлов А. Н., Михайлов В. А., Шейко Е. А. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИНЖИНИРИНГА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУРЫ ВЕРТОЛЕТНОГО ГТД.....	22
Муховатый А. А. СИНТЕЗ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПО ПРИВЕДЕННОЙ КРИВИЗНЕ, ПРЯМОПРОПОРЦИОНАЛЬНО СИНУСУ УГЛА ПРОФИЛЯ.....	33
Овчинников Е. В., Свистун А. Ч., Матук Е.В., Белаш В.Ч., Овчинников А.Е. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ПО БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	40
Полтавец В. В. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫМИ УПРАВЛЯЮЩИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ.....	46
Полуянович Н. К., Дубяго М. Н., Качелаев О. В. РАДИКАЛЬНО-ЦЕПНОЙ МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЧАСТИЧНЫМИ РАЗРЯДАМ.....	57
Яицков И. А., Поляков П. А., Задаянчук Н. А., Дедусенко Р. Н. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ АДАПТАЦИИ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ	64
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Bendik T. I., Okovity V. V., Litvinko A. A., Astashinsky V. M. PROPERTIES OF MULTILAYER PLASMA COATINGS FROM MATERIALS BASED ON M-CROL.....	71

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Баранов А. В.	3
Белаш В. Ч.	40
Воронцов А. А.	3
Дедусенко Р. Н.	64
Дубяго М. Н.	57
Задаянчук Н. А.	64
Качелаев О. В.	57
Котляров Б. С.	15
Котляров В. Б.	15
Котляров С. Б.	15
Лахин А. М.	9
Матук Е. В.	40
Михайлов А. Н.	15, 22
Михайлов В. А.	22
Михайлов Д. А.	22
Муховатый А.А.	33
Овчинников А. Е.	40
Овчинников Е. В.	40
Полтавец В. В.	46
Полуянович Н. К.	57
Поляков П. А.	64
Свистун А. Ч.	40
Шейко Е. А.	22
Шереметьев А. Е.	3
Яицков И. А.	64
Astashinsky V. M.	71
Bendik T. I.	71
Devoino O. G.	71
Litvinko A. A.	71
Okovity V. A.	71
Okovity V. V.	71
Panteleenko F. I.	71

ПРАВИЛА

представления материалов в международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ»

Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» издается с 1994 года. В этом сборнике публикуются ученые и специалисты более чем из 35 стран мира.

Сборник научных трудов является специальным изданием, научно-технические статьи которого проходят **обязательное рецензирование**. Данный сборник включен в следующие программы:

1. В сборнике могут публиковаться научно-технические статьи и результаты диссертационных работ.
2. Сборник включен в **перечень ВАК ДНР** (приказ № 774 от 24.07.2017 г.).
3. Сборник имеет сайт <http://ptsm.donntu.ru>, а также размещен на сайте кафедры «Технология машиностроения» ДонНТУ, г. Донецк: <http://tm.donntu.ru>
4. Сборник включен **базу данных РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) (лицензионный договор № 177-04/2013 от 12.04. 2013 г.)** и размещен на сайте НЭБ (Научная электронная библиотека, г. Москва, Россия, <http://elibrary.ru>)
5. Данный сборник имеет **международную индексацию ISSN 2073-3216 (печатная версия) и ISSN 2518-7120 (сетевое издание)**

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

Содержание статей должно отражать новые достижения науки и техники в области машиностроения, их практическое значение, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны представляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, за несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность в статье данных полностью несут авторы статьи.

Присланные в редакционную коллегию статьи подвергаются обязательному рецензированию. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера без согласования с авторами, а также не публиковать статьи, которые не отвечают нашим требованиям.

Языки представления рукописей русский и английский.

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА

Тематика представляемых статей должна основываться на проблемах машиностроения (механики) и представляться в рамках следующих направлений:

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино- и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения.
2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.

3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления машиностроительным производством.

4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов в машиностроении.

5. Управление качеством продукции и технических систем машиностроения. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

7. Современные проблемы инженерии материалов. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии в машиностроении.

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

В рамках сборника можно представлять рекламу продукции, которая будет помещена после рукописей статей.

СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ

Научно-технические статьи, представляемые в данный сборник должны иметь следующие элементы:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- формулирование цели и постановка задач работы;
- представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, формулирование рекомендаций;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Для принятия решения о включении материалов Вашей статьи в сборник необходимо выслать в адрес редакционной коллегии следующее:

- заявку и сведения об авторах статьи;
- материалы статьи;
- экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;
- все материалы отправляются по E-mail по адресам: tm@fimm.donntu.ru или mntk21@mail.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

1. Текст статьи выполняется объемом от 5 до 10 страниц (**обязательно полные страницы**), формат А4 (210x297 мм) с полями: верхнее и нижнее – 30 мм, а левое и правое - 25 мм. Страницы не нумеровать. Статьи оформить с применением редактора WinWord (не ниже версии 6,0) шрифтом Times New Roman, выполненным в соответствии с образцом оформления, межстрочный интервал - 1,0, шрифт – 12pt. Материалы представить в электронном виде.

2. Порядок оформления. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, инициалы и фамилии авторов, ученая степень и звание (сокращение по ГОСТ 7.11-2003 и 7.12-2003), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключе-

ние или выводы, список литературы, дополнительные аннотации на других языках с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. **УДК** печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верхнего поля. На следующей строке слева жирными строчными буквами – **инициалы и фамилии** авторов с учеными степенями и званиями, на следующих строках – полное название **организаций и стран** (через запятую, слева). На следующей строке курсивом слева – **тел./факс и электронный адрес** одного из авторов. Через один интервал - **название статьи**, печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать по ширине, максимально три строки. Через один интервал - **аннотации с ключевыми словами** (слово аннотация не пишется) на двух языках шрифтом 10 pt, *курсивом*. Через один интервал – материалы статьи, шрифт 12 pt (язык изложения – по выбору авторов, межстрочный интервал 1,0). Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Между соответствующими разделами статьи необходимо делать интервал. (См. образец оформления материалов). Абзац текста – 1,25.

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате *.bmp, *.gif, *.psx, *.dwg, *.jpg - размерами не менее 60х60 мм внедренными объектами (по ходу материалов). Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рисунок 3. Схема устройства. Текст названия рисунка группируется с рисунком. Каждый рисунок должен иметь один интервал сверху и снизу.

4. Формулы и математические знаки должны быть понятны. Показатели, степени и индексы должны быть меньше основных знаков и выполняться в соответствии с редактором формул Microsoft Equation. Формулы номеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля), только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом должен выполняться один интервал. Формулы выполняются курсивом.

Стиль формул для Microsoft Equation: Full - 12 pt, Subscript/Superscript - 10 pt, Sub-Subscript/Superscript - 8 pt, Symbol - 12 pt, Sub-Symbol - 10 pt.

5. Все таблицы должны иметь название и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту, например: Таблица 2. Классификация муфт. Каждая таблица должна иметь один интервал сверху и снизу.

6. **Список литературы** должен быть приведен в конце статьи в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 . Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

7. Файл со статьей необходимо назвать по фамилиям и инициалам авторов в соответствии с работой (например: Иванов И.И., Петренко П.П.)

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

9. Материалы, не отвечающие перечисленным требованиям и тематике данного сборника, а также поступившие в редакционную коллегию с опозданием, **опубликованы не будут**.

СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:

1. УДК (Например, **УДК 621.01**) (располагать вверху справа, шрифт жирный, 12 pt).

2. Инициалы и фамилии авторов (слева, шрифт жирный, 12 pt), ученая степень и звание, затем на следующей строке - полное название *организаций и стран* (слева, 12 pt), на следующей строке – *Тел./факс и электронный адрес* (слева, курсив, 12 pt).

3. Название статьи (слева, шрифт жирный, 12 pt, максимум три строки).

4. Пустые строки, межстрочный интервал и размеры шрифта статьи. Пустые строки выполняются между названием статьи - вверху и внизу, перед соответствующими разделами работы (один пробел) и списком литературы, а также между дополнительной аннотацией вверху и внизу. Межстрочный интервал – **1,0**. Размер шрифта статьи - **12 pt**, размер шрифта аннотаций и авторского знака - **10 pt**.

5. Аннотации (Abstract) (*слово аннотация не пишется*), (*курсив, 10 pt*). Первая аннотация пишется на языке статьи, а вторая на английском, если статья на английском языке, первая аннотация пишется на английском языке, а вторая – на русском языке.

В аннотации приводятся краткие сведения о всей статье в целом на языке статьи. Объем аннотаций приблизительно до 10 строк, аннотация выполняется курсивом.

6. Ключевые слова (Keywords) (*приводится 5-6 ключевых слов статьи*), выполняются курсивом на следующей строке от аннотации. (*курсив, 10 pt*)

7. Введение (Introduction). (12 pt)

Во введении приводится аналитический (исторический) обзор современного состояния вопроса исследования, выполняется постановка проблемы исследования или показывается актуальность данного исследования (работы). Здесь нужно обязательно указать результаты последних исследований других авторов. А также сформулировать цель и задачи исследований.

8. Основное содержание и результаты работы (The main contents and outcomes of activity). (Авторы могут дополнять работу другими разделами) (12 pt).

В данном разделе излагаются и подробно разъясняются полученные авторами теоретические положения и практические результаты. Приводятся принятые гипотезы и используемые допущения, разъясняются малоизвестные термины, аббревиатуры и условные обозначения. Для теоретических положений приводятся их доказательства и необходимые математические преобразования. Для экспериментальных исследований кратко описываются методики их проведения, способы обработки данных и результаты проверок адекватности и достоверности результатов.

9. Авторский знак. Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2022 (10 pt).

10. Заключение (Conclusion) (12 pt)

В заключении излагаются выводы по полученным авторами результатам, описываются примеры их практического применения, предлагаются рекомендации относительно их использования, приводятся выводы, а также указываются перспективы дальнейших исследований по данной проблематике.

11. Литература (References). (12 pt)

Список литературных источников должен быть составлен в порядке ссылок на них. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Количество библиографических источников должно быть не менее 5-6, в том числе 3 источника должно быть за последние 5 лет.

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра «Технология машиностроения», Редакционная коллегия сборника.

Тел./факс: +7-856- 301-08-40.

Е-mail: tm@fimm.donntu.ru или mntk21@mail.ru

<http://ptsm.donntu.ru>

- **Публикация статей в международном сборнике научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» - выполняется бесплатно**

Образец оформления материалов
УДК 621.85.05-034(12 pt)

И. И. Иванов, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)

Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)

Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)

Тел./Факс: +7 (856) 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.ru (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

ОСНОВЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СБОРОЧНЫХ СИСТЕМ (слева, 12 PT, ЖИРНЫМ, ЗАГЛАВИЕ МАКСИМУМ ТРИ СТРОКИ)

(пустая строка - 12 pt)

*В статье приведены данные по структурному синтезу сборочных
.....
..... уравнений описывающих процесс сборки изделий. (курсив, 10 pt, до 10 строк).*

Ключевые слова: структура технологии, синтез, процесс, технология, сборка. (курсив, 10 pt, 5
...6 слов)

(пустая строка - 10 pt)

I. I. Ivanov, P. P. Petrenko (10 pt)

(10 pt)

BASES OF THE STRUCTURED SYNTHESIS OF THE ASSEMBLY SYSTEMS (10 pt)

The efficient design of assembly machinery is vitally important

.....
.....as noun description of functions of presented in the paper.

Keywords: structured syntheses, process of the assembly, technological system. (курсив, 10 pt)

(пустая строка - 12 pt)

1. Введение (12 pt)

Сборочные системы являются сложными иерархическими системами. Одним из условий [1] повышения производительности ... сборочных технологических систем (рис. 5). Технологические системы

(пустая строка - 12 pt)

2. Основное содержание и результаты работы (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы
.....

информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

$$k_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (1)$$

где k_m - элемент множества;

.....
....

..... позволили разработать общие алгоритмы функционирования системы.

(пустая строка - 12 pt)

3. Общий алгоритм и рекомендации (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм

.....

..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

4. Цифровые модели (12 pt)

В работе разработаны цифровые структурно-логические модели структуры сборочных систем, выполненные с применением основных положений алгебры структур

.....

(пустая строка - 12 pt)

5. Заключение (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов

.....

..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности

.....

..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации

.....

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2022 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt))

..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

ЛИТЕРАТУРА:

(центрировать, 12 pt, не менее 5 ... 6 библиографических источников)

1. Ким, И. П. Исследование эффективности роторных машин / И. П. Ким. – К: КПИ, 1985. – 123 с. ISBN 966-7907-22-8.

2. Устюгов, А. В. Надежность технологических машин / А. В. Устюгов. – Донецк: ДонНТУ, 1998. – 425 с. ISBN 966-7907-23-6.

3. Савельев, А. А. Сборка машин / А. А. Савельев – М.: Наука, 2009. – 342 с. ISBN 966-7907-26-9.

4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.

5. Базров, Б. М. Модульные технологии / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2000. – 368 с. ISBN 5-217-03061-5.

6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин //Наукоемкие технологии в машиностроении: ежемесячный научно-

технический и производственный журнал. – М: Машиностроение, 2014. - № 9. – С. 11-17.

7. Любшин, А. Н. Особенности полировки лопаток с коррозионными разрушениями покрытий /А. Н. Любшин, А. Н. Шейко, Б. Л. Недашковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – Вып. 1 (25). – С. 207-212.

пустая строка - 12 pt)

Поступила в редколлегию _____ (дата поступления статьи, 10 pt)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Выпуск 3 (86)' 2024

Главный редактор

д-р техн. наук, проф. А. Н. Михайлов

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Технический редактор Д. О. Киселица

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,
тел. +7 (856) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. + 7 (949) 306-08-79,
+7 (856) 301-08-05. E-mail: tm@fimm.donntu.ru. Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

Подписано к печати 20.02.2024 г.

Формат 60х84^{1/16}. Бумага Maestro.

Гарнитура «Times New Roman». Печать лазерная.

Усл. печ. л. 5,17. Уч.-изд. л. 6,51. Тираж 300 экз.

Отпечатано в рекламно-издательском отделе учредителя

РИО «Донецкая политехника»

Адрес: г. Донецк, ул. Артема, 58

Тел.: +7 (856) 301-09-67