

Вып. 3 (78)' 2022 **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



ДОНЕЦКИЙ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 3 (78)' 2022



ДОНЕЦК - 2022

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО 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 (78)' 2022

Донецк – 2022

УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 1 от 1 апреля 2022 г.)

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

Издается при содействии **Международного союза машиностроителей**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Михайлов А.Н. (гл. редактор), Гусев В.В. (зам. гл. редактора), Лахин А.М. (секретарь) (ДНР), Байков А.В. (ДНР), Бахадиров Г.А. (Узбекистан), Братан С.М. (Россия), Буленков Е.А. (ДНР), Бутенко В.И. (Россия), Витренко В.А. (ЛНР), Горобец И.А. (ДНР), Грубка Р.М. (ДНР), Данияров Н.А. (Казахстан), Еронько С.П. (ДНР), Ивченко Т.Г. (ДНР), Коваленко В.И. (ДНР), Мазуру С. (Молдова), Маляренко А.Д. (Беларусь), Мельникова Е.П. (ДНР), Навка И.П. (ДНР), Неделку Д. (Румыния), Поветкин В.В. (Казахстан), Прутяну О. (Румыния), Родованович М. (Сербия), Суслов А.Г. (Россия), Тока А. (Молдова), Федонин О.Н. (Россия), Хандожко А.В. (Россия), Чернышев Е.А. (ДНР), Шабаетов О.Е. (ДНР)

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра «Технология машиностроения». Тел.: +38 062 301-08-40

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)

© Авторы статей, 2022
© ГОУВПО «ДОННТУ», 2022

УДК 621.002:539.3(075.8)

В. И. Бутенко, д-р техн. наук, профессор; **Ю. В. Корольков**, канд. техн. наук, доцент
Донской государственной технической университет, Россия
Тел.: +7(928)600-57-61; E-mail: butenkowiktor@yandex.ru

ТЕМПЕРАТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

Исследовано изменение величины технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя детали, подвергнутой отделочно-упрочняющей обработке, от температуры эксплуатации. Показано, что температурная устойчивость технологических остаточных напряжений зависит от химического состава материала и условий эксплуатации детали. Доказано, что величина технологических остаточных напряжений пропорциональна удельной накопленной энергии деформации в материале поверхностного слоя детали

Ключевые слова: остаточные напряжения, поверхностный слой, отделочно-упрочняющая обработка, удельная накопленная энергия деформации.

V. I. Butenko, Y. V. Korolkov

TEMPERATURE STABILITY OF TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESS IN THE PARTS SURFACE LAYER MATERIAL

The change in the value of technological residual stresses in the material of the part surface layer subjected to finishing and hardening treatment from the operating temperature has been investigated. It is shown that the thermal stability of technological residual stresses depends on the material chemical composition and the part operating conditions. It is proved that the value of technological residual stresses is proportional to the specific accumulated deformation energy in the material of the part surface layer.

Keywords: residual stresses, surface layer, finishing and hardening treatment, specific accumulated deformation energy.

1. Введение

В современном машиностроительном производстве в подавляющем большинстве случаев технологические процессы механической обработки деталей предусматривают финишные операции, при выполнении которых в материале поверхностного слоя детали формируются технологические остаточные напряжения, оказывающие в дальнейшем существенное влияние на эксплуатационные свойства детали. В качестве финишных операций при обработке деталей машин очень часто назначают шлифование или отделочно-упрочняющую обработку. Известно [1], что эти способы финишной обработки создают в поверхностном слое детали разные по знаку, величине и глубине распространения технологические остаточные напряжения. В процессе эксплуатации детали могут подвергаться нагреву, который влияет не только на величину технологических остаточных напряжений, но и характер распределения их по толщине поверхностного слоя. Поэтому исследования температурной устойчивости технологических остаточных напряжений, созданных в материале поверхностного слоя в процессе финишной обработки детали, имеют научную и практическую значимость.

2. Основное содержание и результаты работы

Проведены экспериментальные исследования влияния температуры на изменения величины технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, созданных в материале поверхностного слоя втулок с наружным диаметром 42 мм, внутренним диаметром 36 мм и длиной 20 мм, прошедших предварительную чистовую токарную обработку на станке мод. 1И611П и последующую обкатку упрочняющим роликом диаметром 40 мм,

© Бутенко В.И., Корольков Ю.В.; 2022 г.

радиусом рабочего профиля 12 мм из закалённой быстрорежущей стали Р6М5. Втулки были изготовлены из сталей 10, 12ХН3А и сплава 45Х25Н20С2А. Величина технологических остаточных напряжений определялась по методике Н. Н. Давиденкова [2] и принималась как среднеарифметическая по десяти последовательно выполненным измерениям. Начальные значения технологических остаточных напряжений достигались в процессе обкатки их поверхностей роликом с усилием $P = 750$ Н, подачей $S_{мин} = 0,01$ м/с за три прохода. Для исследований отбирались втулки, у которых технологические остаточные напряжения отличались от их среднеарифметического значения не более, чем на ± 5 МПа. При этом диапазон изменения параметра шероховатости Ra обработанных поверхностей втулок составлял $Ra = (1,6 - 2,0)$ мкм.

Нагрев каждой партии исследуемых втулок после обкатки их наружных поверхностей роликом осуществлялся в лабораторном сушильном шкафу мод. СМ50/250-250ШС в течение 60 мин. с интервалами температур $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$. Одновременно в сушильный шкаф помещали 10 предварительно обработанных втулок. Для каждой партии исследуемых образцов устанавливалась своя температура нагрева. Технологические остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ определялись после охлаждения на воздухе исследуемых втулок до температуры 20°C .

Результаты выполненных исследований представлены на рис. 1, из которого следует, что для каждой марки стали или сплава в функциональной зависимости $\sigma_{ост} = f(\theta)$ есть критическая температура нагрева $\theta_{кр}$, выше которой величина сформированных в процессе упрочняющей обработки материала поверхностного слоя детали технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ резко уменьшается. При этом для сталей и

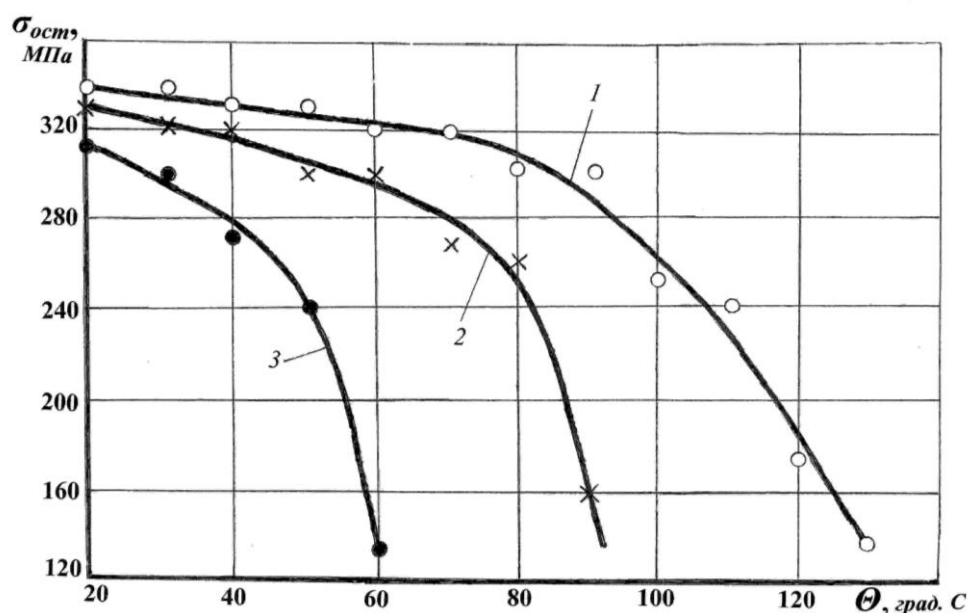


Рисунок 1. Изменение величины технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ в материале поверхностного слоя втулок от температуры нагрева θ : 1 – сплав 45Х25Н20С2А; 2 – сталь 12ХН3А; 3 – сталь 10.

сплавов, легированных хромом и никелем (кривые 1, 2), значение критической температуры $\theta_{кр}$ значительно выше, чем для малоуглеродистых нелегированных сталей (кривая 3). В связи с этим были проведены исследования по ранжированию температурной

устойчивости технологических остаточных напряжений у наиболее распространённых сталей и сплавов, используемых в современном машиностроении.

Критерием для ранжирования исследуемых железоуглеродистых сплавов по критической температуре нагрева $\Theta_{кр}$ было принято снижение величины технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ на 20% в течение 60 мин непрерывного нагрева.

Результаты выполненных исследований приведены на рис. 2, из которого следует, что упрочняющую обработку поверхностного слоя целесообразно проводить для деталей, изготавливаемых из высоколегированных сталей и сплавов с высоким содержанием хрома и никеля. Детали из этих сталей и сплавов обычно эксплуатируются при повышенных температурах.

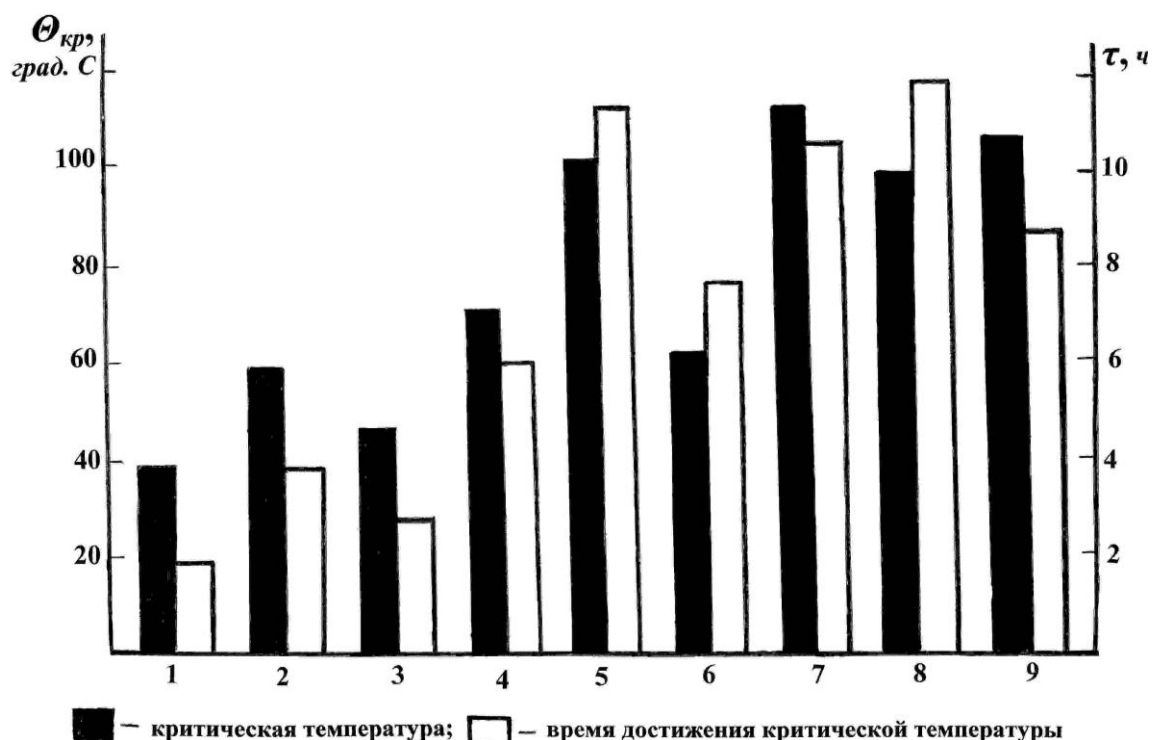


Рисунок 2. Ранжирование сталей и сплавов по температурной устойчивости технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$: 1 – сталь 10; 2 – сталь 12ХН3А; 3 – сталь 38ХМЮА; 4 – сталь 50ХН; 5 – сталь 110Г13Л; 6 – сплав 45Х25Н20С2А; 7 – сплав ХН70ВМТЮ; 8 – сплав ЖС26ВСНК; 9 – сплав ЖС6У

Для выявления причин снижения величины технологических остаточных напряжений при нагреве деталей были проведены сравнительные исследования температурной устойчивости технологических остаточных напряжений по абсолютной величине $|\sigma_{ост}|$, полученных на плоских образцах из стали 12ХН3А размером $B \times H \times L = 20 \times 2 \times 200$ мм после шлифования на плоскошлифовальном станке мод. 3Е711ВФ1 и обкатки упрочняющим роликом на вертикально-фрезерном станке мод. 6Т13 по способу, описанному в работе [3]. Определение $|\sigma_{ост}|$ производилось после каждого увеличения температуры нагрева на $\Delta\Theta = 10^\circ\text{C}$ и продолжительности нагрева 60 мин.

Представленные на рис. 3 результаты исследований свидетельствуют о том, что температурная устойчивость технологических остаточных напряжений сжатия после упрочняющей обработки (рис. 3, кривая 1) выше температурной устойчивости техноло-

гических остаточных напряжений растяжения, сформировавшихся в процессе шлифования (рис. 3, кривая 2). Было сделано предположение о том, что такое расхождение в температурной устойчивости технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ связано с особенностями энергетического состояния материала поверхностного слоя детали, созданного в процессе отделочно-упрочняющей обработки и шлифования. Действительно, согласно исследованиям, выполненным в работах [4, 5], эффективность того или иного внешнего воздействия на поверхность обрабатываемой детали зависит от скорости изменения плотности внутренней энергии $\mathcal{E}(\Delta H, t)$ в элементе материала поверхностного слоя определяемый по формуле:

$$\mathcal{E}(\Delta H, t) = \mathcal{E}(\Delta H, 0) + \sum_{i=1}^N \int_0^t \mathcal{E}_i(\Delta H_i, t_i) dt,$$

где $\mathcal{E}(\Delta H, 0)$ – плотность внутренней энергии в элементе материала поверхностного слоя в исходном состоянии;

$\mathcal{E}_i(\Delta H_i, t_i)$ – скорость изменения плотности внутренней энергии в элементе материала поверхностного слоя при единичном внешнем воздействии (например, проходе шлифовального круга или упрочняющего ролика);

N – число единичных воздействий на обрабатываемую поверхность детали за время t .

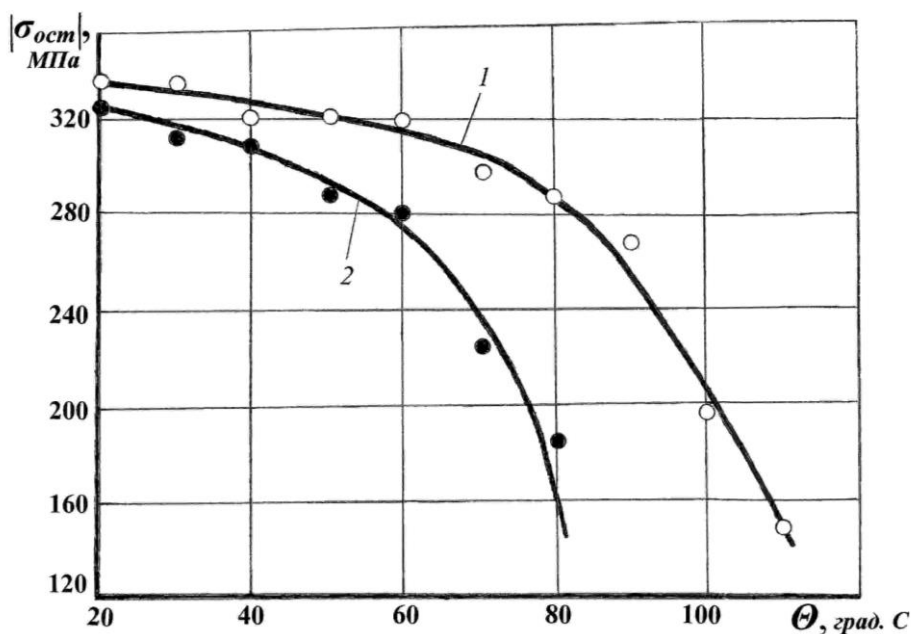


Рисунок 3. Изменение величины технологических остаточных напряжений $|\sigma_{ост}|$ в материале поверхностного слоя втулок от температуры нагрева Θ упрочнённых (кривая 1) и шлифованных (кривая 2) поверхностей втулок из стали 12ХНЗА.

Если принять плотность внутренней энергии в материале поверхностного слоя $\mathcal{E}(\Delta H, 0) = const$ при различном характере внешнего воздействия на обрабатываемую деталь, то скорость изменения плотности внутренней энергии $\mathcal{E}_i(\Delta H_i, t_i)$ после прохода шлифовального круга или упрочняющего ролика будет пропорциональна удельной накопленной энергии деформации в материале поверхностного слоя $\mathcal{E}_{уд}$. Экспериментально величина $\mathcal{E}_{уд}$ после каждого прохода шлифовального круга или упрочняющего ролика может быть определена на установке, использующей метод дифференциальной сканирующей калориметрии [5, 6].

На рис. 4 приведены гистограммы изменения накопленной энергии деформации $\mathcal{E}_{уд}$ в материале поверхностного слоя деталей в течение трёх проходов шлифовального круга и упрочняющего ролика, из анализа которых следует, что величина $\mathcal{E}_{уд}$ при обкатке поверхности роликом выше, чем при шлифовании. Следовательно, согласно выше приведённой формулы при отделочно-упрочняющей обработке скорость изменения плотности внутренней энергии $\mathcal{E}(\Delta H, t)$ в элементе материала поверхностного слоя выше, чем при шлифовании. Это обуславливает более высокую температурную устойчивость технологических остаточных напряжений сжатия.

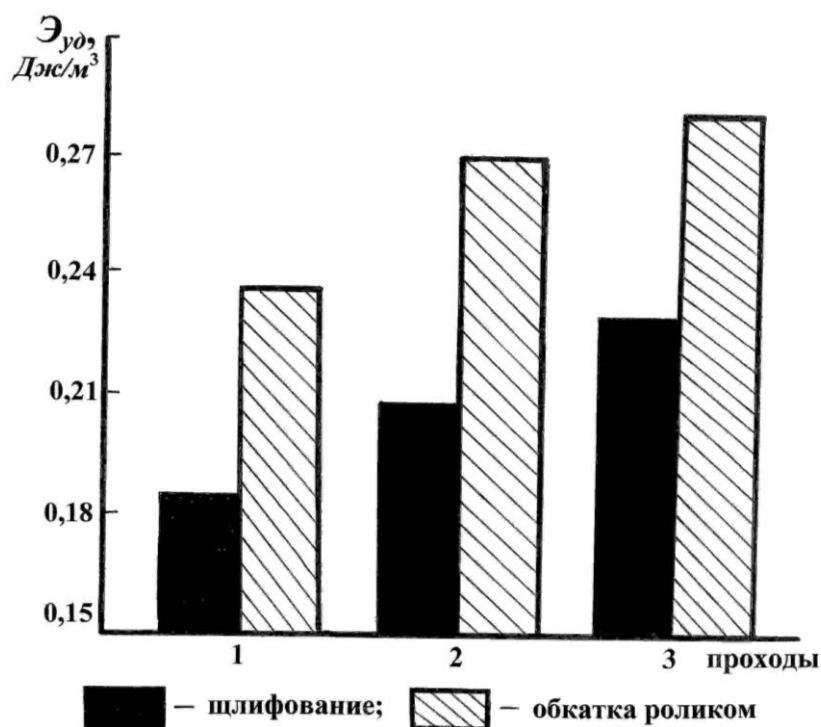


Рисунок 4. Гистограммы изменения удельной накопленной энергии деформации $\mathcal{E}_{уд}$ в материале поверхностного слоя деталей в зависимости от способа обработки и числа проходов инструмента

Исследования показали, что показателем температурной устойчивости технологических остаточных напряжений в материале поверхностного слоя деталей является температурно-временная характеристика $\Theta-t$, зависящая как от химического состава материала деталей и принятого способа финишной обработки их поверхностей, так и условий эксплуатации. В табл. 1 приведены значения температурно-временных харак-

Таблица 1. – Значения температурно-временных характеристик $\Theta-t$ для сталей и сплавов, град.С×ч

Способ обработки	Сталь 12ХН3А	Сталь 30ХГСА	Сталь 38ХМЮА	Сплав 45Х25Н20С2А	Сплав ХН70ВМТ Ю
Шлифование	1250	1380	1180	2360	2660
Обкатка роликом	1570	1720	1410	2730	3050

теристик $\Theta-t$ для некоторых легированных сталей и сплавов, широко используемых в двигателестроении, нефтегазоперерабатывающем машиностроении, при создании машин и механизмов для горнодобывающей промышленности. Приведённые в табл. 1 значения температурно-временных характеристик $\Theta-t$ получены экспериментальным путём для критерия снижения величины технологических остаточных напряжений 20%. Они свидетельствуют о том, что упрочняющая обработка поверхностей деталей машин позволяет на 15-20% повысить температурно-временные характеристики сталей и сплавов. Исследования показали, что наличие в материале поверхностного слоя деталей технологических остаточных напряжений сжатия также позволяет в процессе эксплуатации повысить характеристику $\Theta-t$. В связи с этим возникает необходимость в создании банка данных температурно-временных характеристик для конструкционных материалов, используемых в современном машиностроительном производстве.

3. Заключение

Таким образом, выполненные исследования указывают на необходимость учитывать при выборе способа финишной обработки поверхностей деталей температурную устойчивость создаваемых в материале поверхностного слоя технологических остаточных напряжений, величина которых зависит от химического состава материала деталей и условий их эксплуатации в изделии. Перспективным является дальнейшее исследование температурно-временных характеристик конструкционных материалов с целью формирования справочных данных по выбору их для деталей, эксплуатируемых при высоких температурах и давлениях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бутенко, В. И. Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2016. – 219 с.
2. Давиденков, Н. Н. Динамические испытания металлов / Н. Н. Давиденков. – М.: ОНТИ, 1936. – 536 с.
3. Бутенко, В. И. Отделочно-упрочняющая обработка деталей: технологии и их эффективность / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2022. – 220 с.
4. Лебедев, В. А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В. А. Лебедев. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2006. – 183 с.
5. Бутенко, В. И. Технологическая совместимость функциональных слоёв и покрытий / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2020. – 169 с.
6. Бутенко, В. И. Установка для определения энергетического состояния материала поверхностного слоя детали / В. И. Бутенко, К. В. Давиденко, Т. С. Сосницкая // Инженер. Студ. науч.-техн. журнал. – 2019. – №2(28). – Донецк: Изд-во ДонНТУ. – С. 24 – 28.

Поступила в редколлегию 02.03.2022 г.

М. А. Васильева, канд. техн. наук, доцент, **А. А. Волчихина**, аспирант
Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
Тел. + 8(921)313-88-98, +8(952)218-56-11;
E-mail: saturn.sun@mail.ru; alexandravolchihina@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНЕРЦИОННОГО СГУСТИТЕЛЯ

Закладка выработанного пространства, осуществляется на месторождениях с подземной добычей, происходит, как правило, с образованием пустот между кровлей и закладочным массивом. Образовавшийся дозаклад может стать причиной аварии на месторождении. Поэтому данная статья поможет рассмотреть проблему образования пустот при закладочных работах, а также обратить особое внимание на использование сгустителя на базе мобильного закладочного комплекса для проведения дозакладочных работ.

В статье рассматривается моделирование работы инерционного сгустителя с построением распределения твердой фракции, скоростей воды и частиц гидросмеси в рабочем резервуаре. На основании полученных данных определены 4 режима работы сгустителя с выявлением рабочего режима.

Ключевые слова: закладочное оборудование, мобильные установки, дозакладка пустот, гидро-транспорт, сгущение гидросмеси, подземная разработка, обратное водоснабжение, осветленная вода.

М. А. Vasilyeva, A. A. Volchikhina

MODELING THE OPERATION OF AN INERTIAL THICKER

Backfilling of mined-out space, carried out at deposits with underground mining, occurs, as a rule, with the formation of voids between the roof and backfilling array. The resulting under-mortgage can cause an accident at the field. Therefore, this article will help to consider the problem of void formation during stowing operations, as well as to pay special attention to the use of a thickener based on a mobile stowing complex for pre-stowing operations.

The article deals with the simulation of the operation of an inertial thickener with the construction of the distribution of the solid fraction, the velocities of water and slurry particles in the working reservoir. Based on the data obtained, 4 operating modes of the thickener were determined with the identification of the operating mode.

Keywords: backfilling equipment, mobile installations, backfilling of voids, hydraulic transport, slurry thickening, underground mining, recycling water supply, clarified water.

1. Введение.

На данный момент на большинстве месторождений с подземной добычей, разработка ведется с закладкой выработанного пространства. Закладочные работы могут осуществляться при помощи: пневматической, гидравлической или механической закладки. Каждая из способов закладки обладает своими недостатками, к примеру: усадка массива, пылеобразование, большие габариты оборудования, большой объем воды [1, 2].

Процесс закладочных работ начинается с формирования гидросмеси на поверхности и самотечный транспорт до выработки по системе трубопроводов.

Закладочные работы в выработках производятся в три этапа: закладочные работы более густой смесью для формирования основания массива, закладочные работы смесью меньшей концентрации для формирования тела массива и закладочные работы густой смесью для формирования массива под кровлю выработки без образования пустот. Данная технология предусматривает полное заполнение выработки, но при подаче подготовленной смеси с поверхности, она расслаивается, и смесь любой концентрации к выработке подходит уже расслоившейся за счет потери гидросмесью своей кинетической энергии, что приводит к расслоению и потере гидросмесью своих рабочих пара-

метров [3]. Расслоившейся смесью производят «заливку» выработки, что приводит к усадке массива и разделению жидкой фазы от твердой фракции. Результатом проведения закладочных работ представленной смесью является образование пустот между сводом выработки и массивом [4, 5].

Образовавшиеся пустоты могут приводить к неоднократным опусканиям подрабатываемого массива горных пород, увеличению степени разрушения подрабатываемых массивов, возникновению зон повышенного горного давления, способные привести к горному удару, поэтому их необходимо ликвидировать, проводя работы по дозакладке образовавшихся полостей [6].

Существуют различные способы дозакладки образовавшихся пустот в зависимости от параметров недозаклада и имеющихся сетей горных выработок [7-10]. К таким способам относят дозакладку с вышележащих горизонтов по выработкам или скважинам, что часто приводит к их забитости, невозможности контроля полноты заполнения и обладает высокой стоимостью работ. Вторым способом является применение различного мобильного оборудования. Но у них есть свои ограничения, к примеру ограничение по допустимой концентрации, высокое изнашивание насоса, большая масса, а также оборудование имеет короткий трубопровод, недостаточной дальности подачи, и применимость только для сухой закладки отдельного мобильного оборудования. Главным недостатком применению любого из выше описанных методов является то, что работы по дозакладке производятся, чаще всего той же расслоившейся смесью, циркулирующей в системе, которой производились закладочные работы. Для решения проблемы недозаклада предлагается применение существующей гидравлической смеси со сгущением непосредственно у закладываемой выработки для получения густой гидро-смеси с необходимыми характеристиками и передачи ее на насосное оборудование.

2. Материалы и методы.

Существуют сгустители, в которых для процесса сгущения гетерогенной среды используются гравитационный, фильтрационный или инерционный принцип осаждения твердого компонента, однако при изучении конструкции этих устройств было выявлено три существенных недостатка: значительные габариты оборудования характеризуются низкой скоростью осаждения и большой длиной осаждения, что способствует большим затратам на время осаждения, наличие высокоизнашиваемых конструктивных элементов сгустителей (лопасти, перегородки, направляющие и тд) время работы, необходимость подведения дополнительных подпитывающих сетей, а также необходимость в очистном оборудовании для воды после сгустительных работ перед отводом в сеть городских канализаций или при повторном использовании [11]. Главным преимуществом инерционного сгустителя является отсутствие механических частей в конструкции для сгущения смеси, а также высокая эффективность сгущения [12, 13].

Основные задачи заключаются в организации оборотного водоснабжения на производстве, сгущение потока на завершающем этапе производства с обеспечением простоты интегрирования оборудования в существующую систему гидротранспорта потока.

Для решения проблемы научным коллективом Горного университета предложена конструкция инерционного сгустителя (рис.1), который может функционировать в условиях существующих промышленных производств и реализовать технологический процесс без капитальных изменений [14, 15].

Инерционный сгуститель состоит из впускного патрубка – 1, центральной камеры – 2 трапецидальной формы, где происходит аккумулялирование и процесс сгущения смеси, два гидродинамических профиля – 5, 6, после столкновения с которыми проис-

ходит инерционное осаждение твердого компонента, два выпускных патрубка (для осветленной воды и высококонцентрированной смеси) – 3, 4, ультразвуковыми поточными плотномерами – 7, 8, регистрирующие содержание твердого компонента в выпускных патрубках, шнек внизу резервуара для ликвидации уплотнения и слеживания сгущенной смеси, а также емкость накопления высококонцентрированной смеси – 9. В условиях экспериментального стенда емкость накопления включена в систему обратного водоснабжения – 11. В емкость после сгущения поступают осветленная вода и сгущенная смесь, происходит смешивание при помощи мешалок - 10, для достижения характеристик исходной гидравлической смеси, чтобы в дальнейшем смесь из емкости – накопителя поступила по системе трубопроводов обратно в центральный резервуар сгустителя для оценки эффективности работы оборудования.

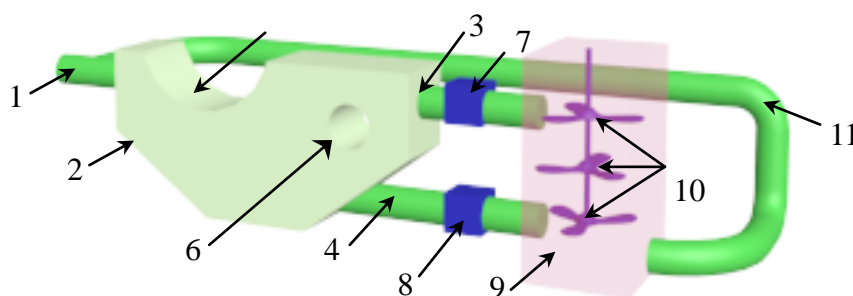


Рисунок 1. Конструкция инерционного сгустителя. 1 – входной патрубок; 2 – центральная камера; 3, 4 – выходные патрубки осветленной воды и сгущенной смеси; 5 – гидродинамический профиль; 6 – цилиндрический гидродинамический профиль; 7, 8 – ультразвуковые поточные плотномеры на выходном патрубке осветленной воды и сгущенной смеси; 9 – емкость – накопитель; 10 – мешалки; 11 – система обратного водоснабжения.

Работа инерционного сгустителя заключается в аккумуляции смеси, осаждении твердого компонента на дно резервуара с закладкой и отделении жидкой фазы для дальнейшего поступлением в обратное водоснабжение.

Основными характеристиками потока при взаимодействии с профилями являются: изменение скорости потока по времени, а также коэффициент подъемной силы и сопротивления. На рис. 2 представлено распределение скоростей потока после взаимодействия с первым и вторым гидродинамическими профилями.

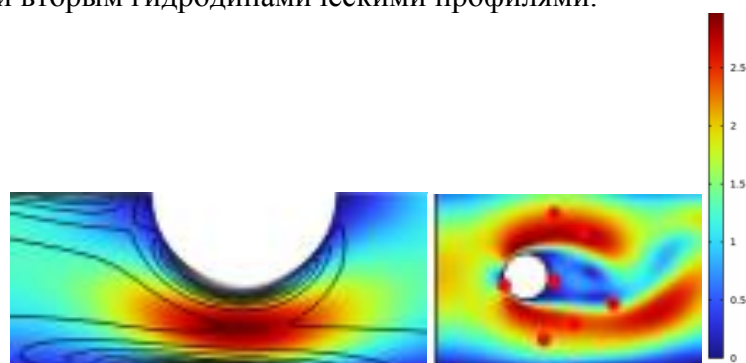


Рисунок 2. Распределение скоростей потока после взаимодействия с гидродинамическими профилями.

3. Моделирование работы оборудования

Для проверки гипотезы о работе инерционного сгустителя был выполнен численный эксперимент, позволивший построить картины распределения массовой доли и скоростей частиц, а также картины распределения скоростей и векторов скоростей воды в расчетной области (рис. 3-5).

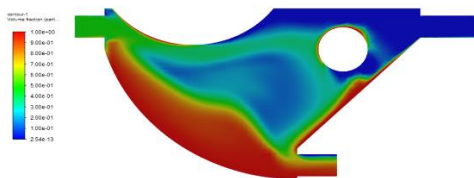


Рисунок 4. Распределение массовой доли частиц в рабочей зоне сгустителя.

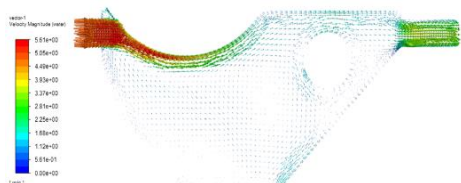


Рисунок 5. Распределение векторов скоростей воды в рабочей зоне сгустителя.

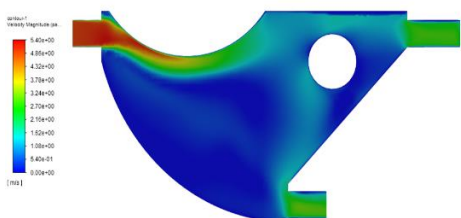


Рисунок 6. Распределение скоростей твердых частиц гидросмеси в рабочей зоне сгустителя.

На данных моделях можно проследить всю технологию процесса сгущения. Гидравлическая смесь с исходными параметрами поступает в резервуар, и взаимодействует с первым гидродинамическим профилем. Часть твердых частиц теряют скорость и осаждаются, сохранившая скорость часть твердых частиц движется дальше, сталкиваясь со вторым гидродинамическим профилем, что способствует потере скорости и осаждению на стенки и дно резервуара, слой сгущенной смеси вдоль нижней части резервуара направляется в сливной патрубков, а осветленная вода в обратную систему.

Анализ картины распределения скоростей потока в расчетной области подтверждает механизм работы инерционного. Высокая скорость потока жидкой фазы на входе в рабочую зону сгустителя после столкновения с гидродинамическим отклоняющим профилем резко снижается, при этом из потока гидросмеси под действием сил инерции и сил тяжести интенсивно отделяется твердая фракция для дальнейшего транспортирования.

Оценка данных потока осветленной жидкости позволила выделить режимные участки работы сгустителя в зависимости от параметров гидросмеси на входе в рабочую зону и давления, создаваемого насосным агрегатом. Моделирование работы, показывает, что существует 4 основных режима работы сгустителя.

В начальном режиме (рис. 7) происходит подача гидравлической смеси и скопление ее в центральном резервуаре, осветленной воды практически нет.

В режиме наполнения (рис. 8) начинается процесс осаждения и на дне резервуара уже образуется сгущенный участок. На данном этапе регистрируется выход твердого вещества плотномерами.

В рабочем режиме (рис. 9) частицы осаждаются за счет потери скорости при взаимодействии с двумя гидродинамическими профилями, формируя сгущенную

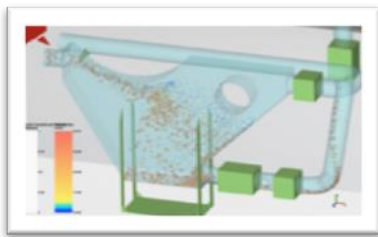


Рисунок 7. Начальный режим работы инерционного сгустителя

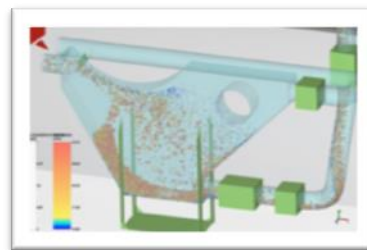


Рисунок 8. Режим наполнения.

область у дна резервуара, движущуюся к выходному патрубку, регистрируется поступление осветленной воды в обратную систему и высококонцентрированной смеси в насос.

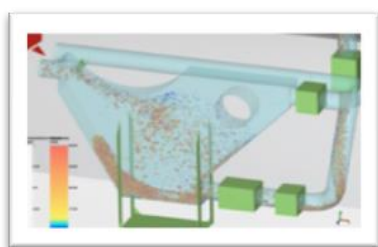


Рисунок 9. Рабочий режим сгустителя.

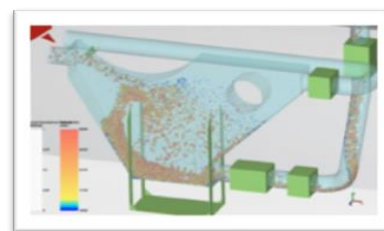


Рисунок 10. Режим выноса.

Режим выноса (рис. 10) показывает процесс взмучивания уже осевших твердых частиц с повторным осаждением, что замедляет процесс сгущения и происходит вынос твердой фазы в обратную систему с осветленной водой.

4. Выводы и заключение.

На основании полученных результатов сделаны выводы:

1. Рабочая скорость гидравлической смеси составляет 1.5-3 м/с, при которой отсутствуют: обратный вынос твердой фракции с повторным осаждением и поступление большого числа твердой фракции в обратную систему водоснабжения.

2. Осветленная вода, отводящаяся сгустителем, возвращается в технологический процесс по системе оборотного водоснабжения, что снизит количество забираемой воды из городской системы. Водозабор будет осуществляться только для подпитки обратной сети.

3. Применение инерционного осаждения путем взаимодействия с двумя гидродинамическими профилями, которые снижают скорость движения частиц, повышают эффективность их осаждения, и увеличивают скорость, длину и время осаждения.

4. Инерционный сгуститель позволит получать высококонцентрированную смесь как готовый-итоговый продукт на завершающей стадии производства без внесения капитальных изменений в схему гидротранспорта смеси и снижение количества применяемых химических реагентов для сгущения смесей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Цыгалова, М. Н. Закладочные работы в шахтах : справочник / под ред. Д. М. Бронникова. – М.: Недра, 1989. – 400 с.

2. Дзюба, С. В. Анализ технологий подземной разработки месторождений полезных ископаемых при ведении горных работ в сложных горно-геологических услови-

ях / С. В. Дзюба, Н. А. Шмелев, Н. В. Коваль // Геотехническая механика: сб. науч. тр. – Украина: Изд-во ИГТМ НАН, 2012. – Вып. 101. – С. 284–291.

3. Коликов, К. С. Закладка выработанного пространства как способ снижения негативного экологического воздействия при подземной угледобыче / К. С. Коликов, И. Э. Мазина, А. Г. Урузбиева // Записки Горного Института – 1987. – Т. 110. – С. 252–259.

4. Медведев, В. В. Совершенствование технологии закладочных работ при камерных системах разработки с закладкой / В. В. Медведев, В. В. Пакулов // Вестник ЗабГУ. – 2013. – №10(101). – С.25-31.

5. Пироженко, В. П. Разработка состава компонентов закладочной смеси на основе хвостов обогащения / В. П. Пироженко // Записки Горного Института – 2008. – Т. 178. – С. 77-81.

6. Шубин, А. А. Моделирование процесса ликвидации подземных пустот в условиях техногенной активизации / А. А. Шубин // Записки Горного Института – 2013. – Т. 204. – С. 101-104.

7. Qiang Zhang Overview of Solid Backfilling Technology Based on Coal-Waste Underground Separation in China / Qiang Zhang, Jixiong Zhang, Zhongya Wu, Yang Chen // Sustainability – 2019 – 11, 2118. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/2118>. (дата обращения: 11.02.2021). – Текст: электронный.

8. Krzysztof Skrzypkowski Compressibility of materials and backfilling mixtures with addition of solid wastes from flue-gas treatment and fly ashes / Krzysztof Skrzypkowski // XVIII Conference of PhD Students and Young Scientists Interdisciplinary Topics in Mining and Geology. – Kraków, Poland, 2018. – Vol. 71. – P. 1-6.

9. Xuan, D. Backfill mining practice in China coal mines / D. Xuan, J. Xu, W. Zhu // Journal of Mines, Metals and Fuels – India, 2013. – V. 61(7–8). – P. 225–234.

10. Сараскин, А. В. Технология закладки выработанного пространства смесями на основе отходов обогащения руд / А. В. Сараскин, А. А. Гоготин // Горный журнал – 2017. – Т. 9 – С. 41-45.

11. Туркин, И. С. Закладка выработанных пространств рудников с применением вертикальных сгустителей / И. С. Туркин, В. В. Олизаренко, Р. Х. Шарипов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – С. 206–210.

12. Васильева, М. А. Мультифизическая модель течения гетерогенного потока при движении по каналу переменного сечения / М. А. Васильева, С. Фёйт // Записки Горного Института. – 2017. – Т. 227. – С. 558-562.

13. Гамбарьян, Л. Г. Транспортирование твердеющих закладочных смесей по полиэтиленовым трубам / Л. Г. Гамбарьян // Записки Горного Института – 1987. – Т. 110. – С. 105-110.

14. Мисюля, Д. И. Конструктивные особенности раскручивающих устройств для циклонов / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Химия и технология неорганических веществ. Труды БГТУ. – 2011. – №3. – С. 153-161.

15. Васильева, М. А. оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства / М. А. Васильева, А. А. Волчихина, М. Д. Морозов // Горный информационно – Аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 133–144. – DOI 0.25018/0236_1493_2021_4_7_39/.

Поступила в редколлегию 27.03.2022 г.

УДК 622.232.72

И. А. Горобец, канд. техн. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

УСТРОЙСТВО И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ ОПОРНОЙ СИСТЕМЫ БЕСЦЕПНЫХ УСТРОЙСТВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ

Приведены варианты конструкции движителя БСП очистного комбайна. Выявлены недостатки движителей БСП. Дан анализ характера изменения радиального усилия зубчатого зацепления БСП. Описано новое устройство и общая схема работы адаптивной опорной системы очистного комбайна. Разработана математическая модель динамических процессов адаптивной опорной системы очистного комбайна.

Ключевые слова: параметр, зубья, колесо, рейка, система, комбайн, влияние.

I. Gorobets

DEVICE AND MATHEMATICAL MODEL OF ADAPTIVE SUPPORT SYSTEM FOR A SHEARER CHAINLESS HAULAGE SYSTEMS

Design Variants rail teeth for a Shearer chainless haulage system are given. The disadvantages of a Shearer chainless haulage system mover are identified. An analysis of the parameters of the chainless haulage system is given. A new device and a general scheme of the shearer adaptive support system are described. A mathematical model of the dynamic processes of the adaptive support system has been developed.

Keywords: parameter teeth, gear, rail, system, shearer, influence

1. Введение

Объекты транспортного, горного, аэрокосмического и других видов машиностроения для преобразования вращательного в поступательное движение комплектуются колёсно-реечными передачами, рис. 1. В большинстве случаев используемые колёсно-реечные движители являются высоконагруженными узлами, испытывающими знакопеременные динамические нагрузки, благодаря характеру внешних воздействий на объект перемещения, конструктивным особенностям профиля зубьев зацепления и наличию трения скольжения в зубчатой передаче, условиям зацепления зубьев передачи и эксплуатационным погрешностям взаимного расположения элементов движителя. Таким условиям нагружения подвержены и устройства перемещения очистных комбайнов для выемки полезных ископаемых (рис. 2) - бесцепные системы подачи (БСП) [1, 2].



Рисунок 1. Вид колёсно-реечного движителя



Рисунок 2. Вид очистного комбайна с БСП

Колёсно-реечные движители БСП очистных комбайнов, за всю историю существования, имели различную конструкцию, рис. 3. К конструктивным

особенностям исполнений реек таких движителей можно отнести разновидности в виде цевочного, рис. 3, а, или зубчатого ряда, рис. 3, б – г.

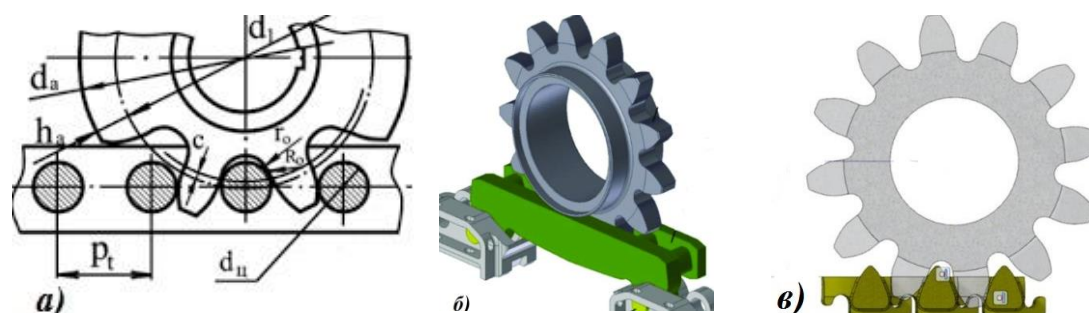


Рисунок 3. Конструктивные особенности реек движителей БСП: а) цевочная, б) зубчатая в) зубчатая повышенной подвижности из элементарных зубьев

Несмотря на разновидности конструкций реек движителя БСП, все они характеризуются наличием знакопеременных радиальных усилий, которые приводят не только к снижению КПД движителя, но и способствуют снижению долговечности передачи, вплоть до прекращения её функционирования [1, 2, 5], рис.4, 5. Негативная ситуация усугубляется наличием необходимого технологического зазора в опорной системе комбайнов, который необходим для реализации перемещения комбайна в условиях неровностей горной поверхности почвы. Такой технологический зазор в опорах очистного комбайна составляет от 10 до 25 мм и является источником возможного изменения межцентрового расстояния между приводным колесом и зубчатой рейкой очистного комбайна, приводящего к резким колебаниям радиального усилия зацепления колёсно-реечного движителя БСП, рис. 4 [1].

Смещение участков зубчатых реек в месте их соединения друг с другом в 3D пространстве, приводящее к изменению шага зубьев сочленённых реек, – также приносит негативные изменения в зацеплении, в качестве появления дополнительного увеличения радиального усилия и снижения КПД движителя.

В связи с перечисленными особенностями работы зубчатого зацепления колёсно-реечного движителя БСП очистных комбайнов, актуальным является вопрос снижения радиальных усилий зацепления движителя, а, следовательно, и повышения КПД зубчатой передачи, за счёт принудительного управления межцентровым расстоянием в зацеплении.

Целью исследований является снижение радиального усилия в зацеплении колёсно-реечного движителя БСП, путём принудительного изменения межцентрового расстояния в зубчатой передаче.

2. Основное содержание и результаты

Выполнение поставленной цели исследований потребовало проведение специальных исследований по определению силовых характеристик зацепления элементов колёсно-реечного движителя БСП очистного комбайна. Для проведения теоретических исследований и моделирования процесса зацепления автором были разработаны математическая модель и методика проведения исследований [2, 6]. В результате моделирования процесса зацепления колёсно-реечного движителя БСП были получены результаты, характеризующие силовые и кинематические параметры зацепления. Анализ результатов моделирования процесса зубчатого зацепления показал

динамический знакопеременный характер изменения радиальных усилий зубчатого зацепления, рис. 6.



Рисунок 4. Вид изношенных приводных зубчатых колёс БСП Eicotrack

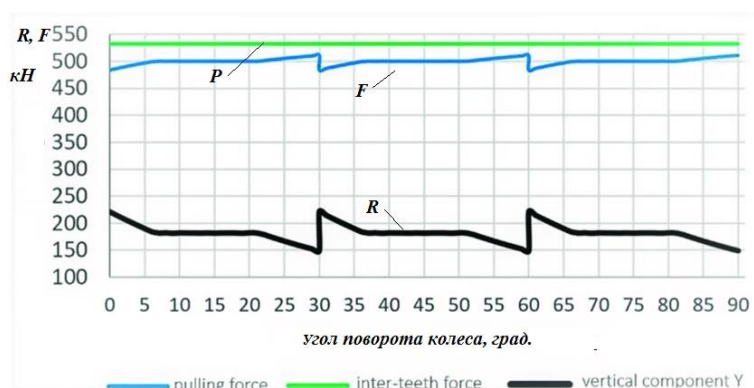


Рисунок 5. Фрагмент реализации силовых характеристик зацепления зубьев колёсно-реечного движителя «KOMTRACK system»: F- тяговое усилие зацепления, R – радиальное усилие зацепления в передаче, P – суммарная сила.

Адекватность результатов моделирования процесса зацепления колёсно-реечного движителя БСП была подтверждена результатами специально проведённых экспериментальных исследований [2].

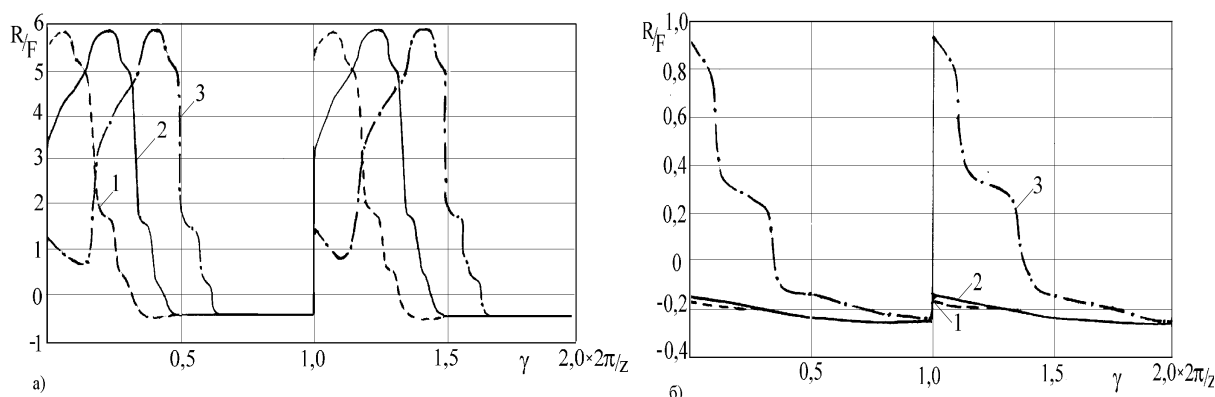


Рисунок 6. Графики изменения радиального усилия в зубчатом зацеплении БСП очистного комбайна КА: а) при номинальном межцентровом расстоянии; б) при максимальном межцентровом расстоянии A_w и шаге зубьев рейки Pp ; 1) минимальном; 2) номинальном; 3) максимальном. R/F - соотношение радиального к тяговому усилию зацепления; γ - угол поворота приводного колеса; Z – число зубьев приводного колеса

Из анализа результатов моделирования можно сделать вывод о значительной чувствительности передачи к изменениям межцентрового расстояния колеса и зубчатой рейки, приводящей к появлению запредельной величины радиального усилия (до 6 раз превышающему величину тягового усилия) и критическому состоянию процесса перемещения, рис. 6, а). При увеличении межцентрового расстояния в движителе предельная величина радиального усилия уменьшалась в 7 раз, рис. 6, б). Как показали результаты исследований, на характер неравномерности и величину радиального усилия зацепления

оказывает влияние и изменения шага зубьев на стыке участков зубчатой рейки колёсно-реечного движителя БСП, рис. 6.

Из анализа полученных результатов моделирования работы колёсно-реечного движителя БСП, рис. 6, можно сделать вывод, что на характер и величину радиального усилия в зацеплении можно повлиять своевременным изменением, межцентрового расстояния передачи. Для выполнения этого изменения возможно использование специального актуатора линейного перемещения. В качестве такого актуатора возможно использование электрического, пневматического или гидравлического устройства. Однако, учитывая большой вес конструкции очистного комбайна, стеснённость габаритов, меры безопасности и степень сложности конструкции перечисленных устройств, очевидно, использование гидравлического устройства в виде гидроцилиндра, будет предпочтительным. Таким образом, гидравлический цилиндр, в качестве исполнительного механизма управления межцентровым расстоянием колёсно-реечной передачи, можно расположить в опоре очистного комбайна. Такая конструкция опорной системы комбайна позволит своевременно изменять межцентровое расстояние в зубчатом зацеплении на величину технологического зазора в опоре. Структурно-функциональную схему системы можно представить в виде адаптивной модели, рис. 7.

Адаптивная опорная система очистного комбайна работает следующим образом, данные сенсора 3 о результатах измерения мгновенной величины радиального усилия зацепления зубьев 1 зубчатого колеса и рейки 2 поступают в пункт управления 4 и далее на исполнительный механизм - гидроцилиндр 5.

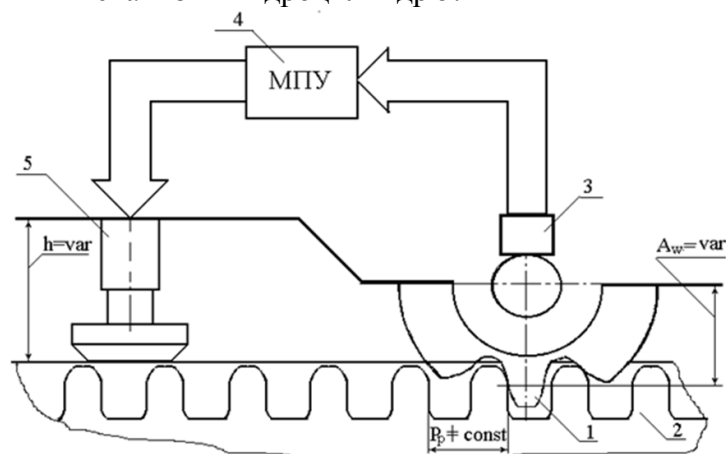


Рисунок 6. Функциональная схема адаптивной опорной системы очистного комбайна

Для выбора конструктивных параметров гидравлической системы привода гидроцилиндра опоры 5 очистного комбайна, прогнозирования параметров переходных процессов, необходимых демпфирующих свойств гидросистемы, разработана математическая модель, описывающая согласованное взаимодействие электрической, механической, гидравлической систем комбайна. Объединение моделей, описывающих указанные системы, осуществляются на основе энергетического баланса, учитывающего трансформацию энергии в различные формы: электрическую в механическую, либо в энергию движения жидкости.

Предполагаем наличие в гидравлической системе комбайна кроме гидроцилиндров – опор, гидроаккумулятора - источника постоянной составляющей давления в гидросистеме, гидравлической арматуры, соединяющей между собой элементы системы, сервисных устройств.

В соответствии с выбранной структурой и составом гидравлической адаптивной опорной системы очистного комбайна, математическая модель должна описывать динамические процессы в узловых точках системы, с учётом воздействия внешних возмущений (передающихся на шток гидроцилиндра), управляющих воздействий и демпфирующих свойств гидроаккумулятора. Тогда, математическая модель гидравлической системы будет иметь следующий вид :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \frac{1}{W\beta}(Q_i - Q_{i+1}) \\ \frac{\rho L}{2A} * \frac{dQ_i}{dt} &= P_i + P(t) - \frac{L}{2D_i} \frac{\rho\lambda}{2A^2} Q_i^2 \text{sign}(Q_i) \\ \frac{\rho L}{2A} * \frac{dQ_{i+1}}{dt} &= -P_{i+1} + P(t) - \frac{L}{2D_i} \frac{\rho\lambda}{2A^2} Q_{i+1}^2 \text{sign}(Q_{i+1}) \\ \frac{dP}{dt} &= k * K_s \frac{1}{V^{k+1}}(Q_i - Q_{i+1}) \\ \frac{1}{V^{k+1}} &= \left(\frac{P}{K_s}\right)^{\frac{k+1}{k}} \end{aligned} \right\}, \tag{1}$$

где: $P(t)$ - изменение давления во времени на исполнительном органе адаптивной опорной системы очистного комбайна (гидроцилиндре); P - давление газа в гидроаккумуляторе; P_i - давление жидкости на i -том участке гидросистемы; Q_i - расход жидкости через i -тое сечение трубопровода; β - модуль объёмного сжатия рабочей жидкости; λ - коэффициент потерь по длине; ρ - плотность рабочей жидкости; D_i - диаметр i -того участка трубопровода; L_i - длина i -того участка трубопровода; A_i - площадь сечения i -того участка трубопровода; V - объем газовой полости гидроаккумулятора; W - объем жидкости i -того участка трубопровода.

Первое уравнение системы (1) учитывает сжимаемость жидкости. Это свойство, как установлено исследованиями [7], оказывает существенное влияние при больших длинах участков трубопровода. Второе и третье уравнения описывают течение жидкости на участке между i и $i+1$ -ой точкой трубопровода. Четвёртое и пятое уравнения учитывают влияние гидроаккумулятора на динамические процессы в системе.

Таким образом, использование разработанной схемы конструкции адаптивной опорной системы очистного комбайна с рационально выбранными параметрами гидравлической системы позволит снизить пиковые радиальные усилия в зацеплении, повысить КПД и долговечность колёсно-реечного движителя БСП очистного комбайна.

Разработанная математическая модель, воспользовавшись рекомендациями [8], позволит произвести имитационное моделирование поведения динамической системы и дальнейшие исследования эффективности системы адаптивного управления процессом зацепления колёсно-реечного движителя БСП очистного комбайна, с целью выявления новых направлений улучшения параметров систем перемещения очистных комбайнов.

3. Заключение

Проанализированы варианты конструктивного исполнения реек колёсно-реечного движителя БСП очистного комбайна. Выявлены общие недостатки движителей БСП, влияющие на КПД и долговечность системы перемещения очистного комбайна. Выполнен анализ характера и величины радиального усилия зацепления и его корреляции с изменением межцентрового расстояния приводного колеса и зубчатой рейки БСП. Предложен общий подход к уменьшению величины негативной составля-

ющей усилия зацепления движителя на базе использования адаптивной системы регулирования межцентрового расстояния колеса и рейки БСП. Описано новое устройство и общая схема работы адаптивной опорной системы очистного комбайна с исполнительным механизмом в виде гидроцилиндра.

Разработана математическая модель описывающая динамические процессы в узловых точках системы, с учётом воздействия внешних возмущений, передающихся на шток гидроцилиндра, управляющих воздействий и демпфирующих свойств гидроаккумулятора. Разработанное устройство и математическая модель функционирования динамической адаптивной опорной системы комбайна позволят выполнить исследования эффективности адаптивного управления процессом зацепления колёсно-реечного движителя БСП и выявить новые направления улучшения параметров систем перемещения очистных комбайнов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kotwica, K. Impact of Geometry of Toothed Segments of the Innovative KOMTRACK Longwall Shearer Haulage System on Load and Slip during the Travel of a Track Wheel / Kotwica K., Stopka G., Kalita M., Bałaga D., Siegmund M. // Open journal MDPI *Energies* - 2021, 14, 2720. <https://doi.org/10.3390/en14092720>

2. Горобец, И. А. Результаты исследования параметров движителей БСП очистных комбайнов. / И. А. Горобец // Разработка месторождений полезных ископаемых. – Донецк: ДПИ, 1991. – Вып. 88. – С. 31-36.

3. Горобец, И. А. Оценка влияния параметров зацепления движителя БСП на производительность горного комбайна /И. А. Горобец // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», 2020. – Вып. № 2(69). – С. 9-15.

4. Лукиенко, Л. В. Расширение области применения электровозной откатки для горно-транспортных машин за счёт использования зубчато-реечных передач / Л. В. Лукиенко, К. В. Гальченко, И. В. Литвинов, В. В. Исаев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Издательство «Горная книга», 2017. – №9. – С. 52-59.

5. Kotwica, K Simulation tests of new solution of the longwall shearer haulage system/ Kotwica K., Stopka G., Gospodarczyk P. // Materials Science and Engineering Innovative mining technologies (IMTech Scientific and Technical Conference) 14–16 October 2019 – Szczyrk: Poland, 2019. – Volume 679, part 2. – P. 1-8.

6. Горобец, И. А. Выбор 3D формы зубьев рейки колёсно-реечного движителя Международного сборника научных трудов / И. А. Горобец // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ГОУВПО «ДОННТУ», 2021. – Вып. №2(73). – С. 22-28.

7. Горелик, В. С. Моделирование устройства уравнивания валков толстолистового стана 3000 / Горелик В. С., Деркач А. В., Хорхордин А. В., Горковенко А. В., Недосекин В. Б. // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 1999. – Вып. 4. – С. 12-17.

8. Гладчук, Е. А. Параметрическое моделирование технической системы нестабильной структуры / Е. А. Гладчук // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып. № 3(54). – С.25-29

Поступила в редколлегию 20.02.2022 г.

УДК 658.512: 519.65

Р. М. Грубка, д-р техн. наук, профессор, **М. В. Долматова**, магистрант;
Ю. В. Сазоненко, магистрант
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР
Тел./Факс: +38 (071) 3114221; E-mail: grubka_roman@mail.ru

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ЗУБЧАТЫМИ ВЕНЦАМИ

В статье представлена методика расчета исходных данных для выполнения конструкторско-технологической подготовки производства цилиндрических колес с пространственно-модифицированными зубчатыми венцами. Существующие способы описания боковой поверхности зубьев на этапах выполнения конструкторской и технологической подготовки производства трудоемки, трудно поддаются автоматизации, которая необходима в современных условиях, особенно при проведении операций с большим количеством данных. Использование предложенной методики позволяет уменьшить сроки выполнения работ путем описания боковой поверхности пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес семейством сплайнов Безье. В работе представлены основные расчетные зависимости, позволяющие выполнить аппроксимацию координат контактных точек на боковой поверхности пространственно-модифицированного зуба цилиндрического зубчатого колеса семейством сплайнов Безье третьего порядка, как по высоте, так и по длине зуба.

Ключевые слова: конструкторско-технологическая подготовка, цилиндрическое колесо, пространственно-модифицированный зубчатый венец, сплайн Безье

R. M. Grubka, M. V. Dolmatova, Y. V. Sazonenko

INITIAL DATA FOR THE DESIGN AND TECHNOLOGICAL PREPARATION OF THE PRODUCTION OF SPUR GEARS WITH SPATIALLY MODIFIED GEAR RIMS

The article presents a methodology for calculating the initial data for the design and technological preparation of the production of cylindrical wheels with spatially modified gear rims. The existing methods for describing the side surface of the teeth at the stages of design and technological preparation of production are laborious, difficult to automate, which is necessary in modern conditions, especially when carrying out operations with a large amount of data. The use of the proposed technique makes it possible to reduce the time of work by describing the side surface of the spatially modified teeth of cylindrical wheels by the family of Bezier splines. The paper presents the main calculated dependences that allow one to approximate the coordinates of contact points on the lateral surface of a spatially modified tooth of a spur gear by a family of Bezier splines of the third order, both in height and in length of the tooth.

Keywords: design and technological support, cylindrical wheel, spatially modified ring gear, Bezier spline

1. Введение

Конкурентное машиностроительное производство подразумевает проектирование и применение современных технологий изготовления и сборки деталей машин, использование для изготовления деталей высокотехнологичного и высокопроизводительного оборудования. Назначение и эксплуатационные свойства объекта производства, особенности технологии его изготовления в основном определяют организационную структуру предприятия и характер его производственного цикла. При этом затраты на освоение новых видов продукции непрерывно увеличиваются с усложнением конструкций и необходимостью сокращения сроков освоения производства. Эффективность выпуска изделий определяется совершенством организации производственного процесса с учетом технико-экономических и организационных связей между различными процессами, средствами производства, службами и подразделениями предприя-

тия. Запуску изготовления новых или модернизированных изделий, в том числе и изделий с пространственно-модифицированными зубчатыми венцами, предшествует конструкторско-технологическая подготовка производства.

К зубчатым колесам и передачам предъявляются повышенные требования по надежности, долговечности, нагрузочной способности при сохранении или уменьшении габаритных размеров. Наиболее перспективным направлением повышения эксплуатационных показателей зубчатых передач является совершенствование геометрии зацепления [1]. В свою очередь работоспособность зубчатых передач зависит от вида и величины перемещений, которые вызваны наличием погрешностей изготовления; погрешностей монтажа зубчатых венцов; погрешностей взаимного положения зубчатых венцов, возникающих в процессе эксплуатации вследствие деформаций элементов зубчатых передач [2, 3]. Наличие в реальном зацеплении погрешностей и деформаций приводит к пространственному характеру контактирования зубьев в зацеплении и к необходимости синтеза новых пространственно-модифицированных зубьев, боковая поверхность которых близка к их естественному износу в процессе эксплуатации.

Конструкторская подготовка производства (КПП) заключается в проектировании новой или модернизации ранее производившейся продукции, а также разработке проекта реконструкции и переоборудования предприятия или его отдельных подразделений. В процессе проектирования определяются назначение и эксплуатационные свойства объекта производства, его конструкция и внешний вид, физико-механические и химические свойства материалов деталей, технико-экономические и другие показатели [4, 5, 6, 7]. Основными целями и задачами КПП являются: непрерывное совершенствование качества продукции, повышение уровня технологичности конструкции, снижение себестоимости изготовления, уменьшения расхода материалов на единицу продукции, снижения эксплуатационных затрат, обеспечение охраны труда и техники безопасности, а также удобство эксплуатации и ремонта изделий.

Продолжением работ по подготовке производства изделия является технологическая подготовка производства (ТПП). Целью ТПП является разработка технологии изготовления изделия в конкретных условиях реального производства, выбор или разработка технологического оборудования и технологического оснащения, режущего и измерительного инструментов. В процессе ТПП решаются следующие основные задачи: отработка изделия на технологичность; разработка технологических маршрутов и процессов; разработка специальной технологической оснастки; технологическое оснащение производства; техническое сопровождение изготовления опытной партии, установочной серии и установившегося серийного производства [8, 9, 10, 11].

Применение информационных технологий при выполнении конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) является приоритетным направлением модернизации и развития современного предприятия. При этом используются современные технологии: 3D-моделирование, аддитивные технологии для получения прототипов изделий, OMV-технологии, инженерный анализ, автоматизированная подготовка управляющих программ для станков с ЧПУ и автоматизированный контроль параметров точности изделия.

Максимально эффективное использование данных, полученных в результате решения задач синтеза новых пространственно-модифицированных зубьев, возможно во время выполнения КТПП цилиндрических колес с пространственно-модифицированными зубчатыми венцами при их представлении в форматах, позволяющих выполнять их автоматическую обработку. Полученные таким образом данные используются при выполнении КТПП для создания трехмерных моделей изделий и при

подготовке комплектов конструкторской документации. На этапе ТПП данные используются в процессе выполнения технологических расчетов геометрии режущего инструмента, траектории его перемещения в процессе изготовления пространственно-модифицированных зубчатых венцов и при выполнении сравнения, во время контроля, соответствия параметров реально нарезанного в процессе формообразования зубчатого венца с теоретически рассчитанными параметрами.

Исходными данными для проведения КТПП изделий с зубчатыми венцами, в том числе и цилиндрических зубчатых колес, являются их основные геометрические характеристики, полученные в результате выполнения проектировочных и проверочных расчетов. Для зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями наряду с основными геометрическими характеристиками необходимо иметь описание геометрии боковой поверхности зубьев в виде удобном для построения трехмерных моделей изделий, последующего выполнения комплекта конструкторской документации и проведения расчетов технологических параметров процесса формообразования зубчатых венцов.

Информация о геометрии изделия и его элементов может быть представлена в виде таблицы значений координат [12], матрично-векторным способом [13, 14, 15] и в виде описания геометрии одной кривой [16] или семейством кривых. Задание геометрии изделий координатами отдельных точек выполняется дискретно и применяется в основном для построения двумерных изображений. В этом случае проведение автоматических расчетов различного вида, с участием координат точек, принадлежащих рассматриваемым пространственным поверхностям имеет ряд существенных ограничений, так как получение результатов может быть только для ограниченного количества таких точек. Матрично-векторный способ задания геометрии изделий позволяет задавать множество точек принадлежащих рассматриваемой поверхности, что в значительной мере способствует автоматизации проводимых расчетов и позволяет получать непрерывную последовательность значения координат точек, принадлежащих поверхности [13, 14, 15]. Однако в случае такого описания поверхности непосредственное ее построение без дополнительной обработки расчетных данных затруднительно.

Описание геометрии боковой поверхности пространственно-модифицированных зубьев семейством кривых, после решения задач профилирования [17, 18], позволяет получать геометрические характеристики изделия непрерывно вдоль одной или нескольких осей детали. Геометрические характеристики изделия получают в привязке к сетке кривых, которые являются линиями пересечения боковой поверхности пространственно-модифицированного зуба с плоскостями параллельными одной из плоскости заданной абсолютной системы координат. Сетка кривых состоит из двух семейств кривых расположенных по длине и по высоте пространственно-модифицированного зуба. В качестве кривых могут быть использованы аналитически описанные гладкие, дважды и более дифференцируемые кривые, с минимальным количеством управляемых элементов. Так в работе [16] в качестве универсального способа описания геометрии профиля зуба цилиндрического зубчатого колеса предлагаются кривые Безье, которые широко используются в системах автоматизированного проектирования. Применение кривых Безье обусловлено рядом их свойств [19, 20].

Цель работы: разработка методики расчета исходных данных для выполнения КТПП цилиндрических колес с пространственно-модифицированными зубчатыми венцами, позволяющей уменьшить сроки выполнения работ путем описания боковой поверхности пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес семейством сплайнов Безье.

2. Основное содержание и результаты работы

Исходными данными для описания боковой поверхности сеткой сплайнов Безье является густота сетки по длине и по высоте зуба. Количество кривых, на боковой поверхности зуба выбирается в зависимости от точности решаемых задач и сводится к заданию значений координат по длине и по высоте зуба шестерни y_1 и z_1 [17, 18]. Для выбранных значений координат y_1 и z_1 , в процессе профилирования определяются параметры контактирования (углы поворота шестерни ϕ_1 и колеса ϕ_2 , угол развернутости эвольвенты φ_2 и координата по длине зуба колеса z_2 и значение третьей координаты x_1 [17, 18]. Используя рассчитанные параметры контактирования координаты контактных точек приводятся к одному положению зуба и к его вертикальной оси [18]. После определения координаты x_1 получаем распределение координат точек, принадлежащих боковой поверхности зуба с пространственной модификацией, которые в дальнейшем и будут использованы для расчета параметров сплайна Безье. Результаты приведения координат контактных точек на боковой поверхности зуба к одному положению зуба и к его вертикальной оси представлены на рис. 1.

Сплайн Безье определяется зависимостью вида [19, 20]:

$$P(\lambda) = \sum_{i=0}^{N-1} J_i^N(\lambda) \cdot P_i, \tag{1}$$

где λ – параметр сплайна Безье, $0 \leq \lambda \leq 1$;

N – степень полинома;

P_i – координаты опорных точек;

$J_i^N(\lambda)$ – аппроксимирующие многочлены Бернштейна, которые равны:

$$J_i^N(\lambda) = C_i^N \cdot \lambda^i \cdot (1 - \lambda)^{N-i},$$

где C_i^N - биномиальные коэффициенты:

$$C_i^N = \frac{N!}{i!(N-i)!}$$

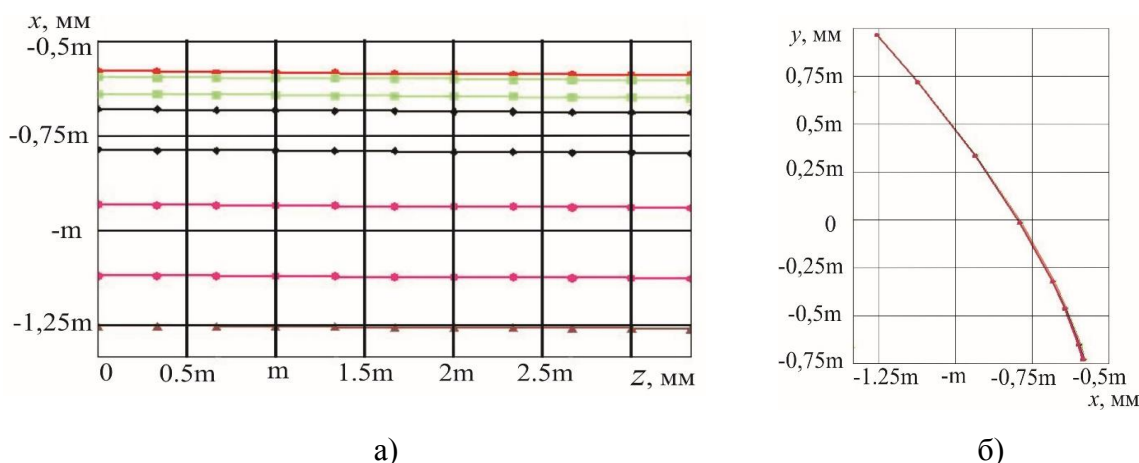


Рисунок 1. Сетка контактных точек на боковой поверхности зуба шестерни, аппроксимированных семейством сплайнов Безье: а) – по длине зуба; б) – по высоте зуба

Выполним аппроксимацию координат контактных точек на боковой поверхности пространственно-модифицированного зуба цилиндрического зубчатого колеса се-

мейством сплайнов Безье третьего порядка по высоте зуба. Для аппроксимации координат контактных точек (рис. 1. б) используем сплайны Безье третьего порядка. Чтобы найти параметры сплайна Безье третьего порядка необходимо задаваться координатами четырех точек принадлежащих боковой поверхности зуба в рассматриваемом сечении.

Биномиальные коэффициенты для сплайна Безье третьего порядка составят:

$$C_0^3 = 1; C_1^3 = 3; C_2^3 = 3; C_3^3 = 1.$$

Аппроксимирующие многочлены Бернштейна сплайна Безье третьего порядка:

$$J_0^3(\lambda) = (1 - \lambda)^3; J_1^3(\lambda) = 3 \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^2; J_2^3(\lambda) = 3 \cdot \lambda^2 \cdot (1 - \lambda); J_3^3(\lambda) = \lambda^3. (2)$$

С учетом аппроксимирующих многочленов Бернштейна (2) зависимость (1) примет вид:

$$P(\lambda) = P_0 \cdot (1 - \lambda)^3 + 3 \cdot P_1 \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^2 + 3 \cdot P_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1 - \lambda) + P_3 \cdot \lambda^3. (3)$$

Записав уравнение (3) для каждой из координат рассматриваемой точки на кривой принадлежащей боковой поверхности зуба получим систему уравнений для определения координат точек аппроксимирующего сплайна Безье в Декартовой системе координат:

$$\begin{cases} x_1(\lambda) = x_{n_k} \cdot (1 - \lambda)^3 + 3 \cdot x_1 \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^2 + 3 \cdot x_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1 - \lambda) + x_{k_k} \cdot \lambda^3; \\ y_1(\lambda) = y_{n_k} \cdot (1 - \lambda)^3 + 3 \cdot y_1 \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^2 + 3 \cdot y_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1 - \lambda) + y_{k_k} \cdot \lambda^3. \end{cases} (4)$$

где $x_{n_k}, x_{k_k}, y_{n_k}, y_{k_k}$ – соответственно координаты начальной и конечной точек на кривой описывающей профиль зуба шестерни;

x_1, x_2, y_1, y_2 - координаты опорных точек сплайна по толщине и по высоте зуба шестерни.

Неизвестными в системе уравнений (4) являются: параметр сплайна λ и координаты его опорных точек x_1, x_2, y_1, y_2 . Известными значениями в системе являются координаты начала и конца кривой, которая описывает профиль зуба, $x_{n_k}, x_{k_k}, y_{n_k}, y_{k_k}$, а также задаются значения функций $x_1(\lambda)$ и $y_1(\lambda)$. Таким образом, в систему (4) входит 5 неизвестных и для определения координат опорных точек x_1, x_2, y_1, y_2 и значения параметра сплайна λ необходимо записать уравнения системы (4) для координат 4-х точек, лежащих на кривой описывающей профиль зуба в рассматриваемом сечении:

$$\begin{cases} x_{n_k} = x_{n_k} \cdot (1 - \lambda_0)^3 + 3 \cdot x_1 \cdot \lambda_0 \cdot (1 - \lambda_0)^2 + 3 \cdot x_2 \cdot \lambda_0^2 \cdot (1 - \lambda_0) + x_{k_k} \cdot \lambda_0^3; \\ y_{n_k} = y_{n_k} \cdot (1 - \lambda_0)^3 + 3 \cdot y_1 \cdot \lambda_0 \cdot (1 - \lambda_0)^2 + 3 \cdot y_2 \cdot \lambda_0^2 \cdot (1 - \lambda_0) + y_{k_k} \cdot \lambda_0^3; \\ x_{p1} = x_{n_k} \cdot (1 - \lambda_1)^3 + 3 \cdot x_1 \cdot \lambda_1 \cdot (1 - \lambda_1)^2 + 3 \cdot x_2 \cdot \lambda_1^2 \cdot (1 - \lambda_1) + x_{k_k} \cdot \lambda_1^3; \\ y_{p1} = y_{n_k} \cdot (1 - \lambda_1)^3 + 3 \cdot y_1 \cdot \lambda_1 \cdot (1 - \lambda_1)^2 + 3 \cdot y_2 \cdot \lambda_1^2 \cdot (1 - \lambda_1) + y_{k_k} \cdot \lambda_1^3; \\ x_{p2} = x_{n_k} \cdot (1 - \lambda_2)^3 + 3 \cdot x_1 \cdot \lambda_2 \cdot (1 - \lambda_2)^2 + 3 \cdot x_2 \cdot \lambda_2^2 \cdot (1 - \lambda_2) + x_{k_k} \cdot \lambda_2^3; \\ y_{p2} = y_{n_k} \cdot (1 - \lambda_2)^3 + 3 \cdot y_1 \cdot \lambda_2 \cdot (1 - \lambda_2)^2 + 3 \cdot y_2 \cdot \lambda_2^2 \cdot (1 - \lambda_2) + y_{k_k} \cdot \lambda_2^3; \\ x_{k_k} = x_{n_k} \cdot (1 - \lambda_3)^3 + 3 \cdot x_1 \cdot \lambda_3 \cdot (1 - \lambda_3)^2 + 3 \cdot x_2 \cdot \lambda_3^2 \cdot (1 - \lambda_3) + x_{k_k} \cdot \lambda_3^3; \\ y_{k_k} = y_{n_k} \cdot (1 - \lambda_3)^3 + 3 \cdot y_1 \cdot \lambda_3 \cdot (1 - \lambda_3)^2 + 3 \cdot y_2 \cdot \lambda_3^2 \cdot (1 - \lambda_3) + y_{k_k} \cdot \lambda_3^3. \end{cases} (5)$$

где $x_{p1}, x_{p2}, y_{p1}, y_{p2}$ - координаты точек принадлежащих кривой, которая описывает профиль зуба шестерни по его высоте в рассматриваемом сечении.

Решив систему относительно параметров сплайна $\lambda_0 - \lambda_3$ и координат опорных точек x_1, x_2, y_1, y_2 , получим систему вида (4), которая позволяет аппроксимировать профиль зуба шестерни в рассматриваемом сечении. Определив параметры сплайнов для ряда сечений, можно выполнить аппроксимацию боковой поверхности пространственно-модифицированного зуба цилиндрического зубчатого колеса семейством сплайнов Безье третьего порядка по высоте зуба.

Выполним аппроксимацию координат контактных точек на боковой поверхности зубьев цилиндрического зубчатого колеса с пространственной геометрией семейством сплайнов Безье четвертого порядка по длине зуба (рис. 1. а). Использование сплайнов Безье 4-го порядка обусловлено необходимостью при выполнении расчета технологических параметров процесса формообразования пространственно-модифицированных зубьев оперировать сразу тремя координатами точки на боковой поверхности зуба.

Биномиальные коэффициенты для сплайна Безье четвертого порядка составят:

$$C_0^4 = 1; C_1^4 = 4; C_2^4 = 6; C_3^4 = 4; C_4^4 = 1.$$

Аппроксимирующие многочлены Бернштейна сплайна Безье третьего порядка:

$$J_0^4(\lambda) = (1 - \lambda)^4; J_1^4(\lambda) = 4 \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^3;$$

$$J_2^4(\lambda) = 6 \cdot \lambda^2 \cdot (1 - \lambda)^2; J_3^4(\lambda) = 4 \cdot \lambda^3 \cdot (1 - \lambda); J_4^4(\lambda) = \lambda^4. \quad (6)$$

С учетом аппроксимирующих многочленов Бернштейна (2) зависимость (1) примет вид:

$$P(\lambda) = P_0 \cdot (1 - \lambda)^4 + 4 \cdot P_1 \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^3 + 6 \cdot P_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1 - \lambda)^2 + 4 \cdot P_3 \cdot \lambda^3 \cdot (1 - \lambda) + P_4 \cdot \lambda^4. \quad (7)$$

Записав уравнение (7) для каждой из координат рассматриваемой точки на кривой принадлежащей боковой поверхности зуба получим систему уравнений для определения координат точек аппроксимирующего сплайна Безье в Декартовой системе координат:

$$\left. \begin{aligned} x_1(\lambda) &= (1 - \lambda)^4 x_{n-k} + 4 \cdot (1 - \lambda)^3 \lambda x_1 + 6 \cdot (1 - \lambda)^2 \lambda^2 x_2 + 4 \cdot (1 - \lambda) \lambda^3 x_3 + \lambda^4 x_{k-k}; \\ y_1(\lambda) &= (1 - \lambda)^4 y_{n-k} + 4 \cdot (1 - \lambda)^3 \lambda y_1 + 6 \cdot (1 - \lambda)^2 \lambda^2 y_2 + 4 \cdot (1 - \lambda) \lambda^3 y_3 + \lambda^4 y_{k-k}; \\ z_1(\lambda) &= (1 - \lambda)^4 z_{n-k} + 4 \cdot (1 - \lambda)^3 \lambda z_1 + 6 \cdot (1 - \lambda)^2 \lambda^2 z_2 + 4 \cdot (1 - \lambda) \lambda^3 z_3 + \lambda^4 z_{k-k}. \end{aligned} \right\} (8)$$

где x_i, y_i, z_i - координаты опорных точек сплайна.

Неизвестными в системе уравнений (8) являются: параметр сплайна λ и координаты опорных точек x_i, y_i, z_i . Известными значениями в системе являются координаты начала и конца кривой, которая описывает профиль зуба, $x_{n-k}, x_{k-k}, y_{n-k}, y_{k-k}, z_{n-k}, z_{k-k}$, а также задаются значения функций $x_1(\lambda)$, $y_1(\lambda)$ и $z_1(\lambda)$. Таким образом, в систему (8) входит 10 неизвестных и для определения координат опорных точек x_i, y_i, z_i и значения параметра сплайна λ необходимо записать уравнения системы (8) для координат 5-ти точек, лежащих на кривой описывающей боковую поверхность зуба по его длине в рассматриваемом сечении:

Решив систему (9) относительно параметров сплайна λ_i и координат опорных точек x_i, y_i, z_i , получим систему вида (8), которая позволяет аппроксимировать линию зуба шестерни в рассматриваемом сечении по его длине. Определив параметры сплайнов для ряда сечений, можно выполнить аппроксимация геометрии боковой поверхности пространственно-модифицированного зуба цилиндрического зубчатого колеса семейством сплайнов Безье четвертого порядка по длине зуба.

$$\left. \begin{aligned}
 x_{n-k} &= (1-\lambda_0)^4 x_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_0)^3 \lambda_0 x_1 + 6 \cdot (1-\lambda_0)^2 \lambda_0^2 x_2 + 4 \cdot (1-\lambda_0) \lambda_0^3 x_3 + \lambda_0^4 x_{k-k}; \\
 y_{n-k} &= (1-\lambda_0)^4 y_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_0)^3 \lambda_0 y_1 + 6 \cdot (1-\lambda_0)^2 \lambda_0^2 y_2 + 4 \cdot (1-\lambda_0) \lambda_0^3 y_3 + \lambda_0^4 y_{k-k}; \\
 z_{n-k} &= (1-\lambda_0)^4 z_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_0)^3 \lambda_0 z_1 + 6 \cdot (1-\lambda_0)^2 \lambda_0^2 z_2 + 4 \cdot (1-\lambda_0) \lambda_0^3 z_3 + \lambda_0^4 z_{k-k}; \\
 x_{p1} &= (1-\lambda_1)^4 x_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_1)^3 \lambda_1 x_1 + 6 \cdot (1-\lambda_1)^2 \lambda_1^2 x_2 + 4 \cdot (1-\lambda_1) \lambda_1^3 x_3 + \lambda_1^4 x_{k-k}; \\
 y_{p1} &= (1-\lambda_1)^4 y_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_1)^3 \lambda_1 y_1 + 6 \cdot (1-\lambda_1)^2 \lambda_1^2 y_2 + 4 \cdot (1-\lambda_1) \lambda_1^3 y_3 + \lambda_1^4 y_{k-k}; \\
 z_{p1} &= (1-\lambda_1)^4 z_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_1)^3 \lambda_1 z_1 + 6 \cdot (1-\lambda_1)^2 \lambda_1^2 z_2 + 4 \cdot (1-\lambda_1) \lambda_1^3 z_3 + \lambda_1^4 z_{k-k}; \\
 x_{p2} &= (1-\lambda_2)^4 x_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_2)^3 \lambda_2 x_1 + 6 \cdot (1-\lambda_2)^2 \lambda_2^2 x_2 + 4 \cdot (1-\lambda_2) \lambda_2^3 x_3 + \lambda_2^4 x_{k-k}; \\
 y_{p2} &= (1-\lambda_2)^4 y_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_2)^3 \lambda_2 y_1 + 6 \cdot (1-\lambda_2)^2 \lambda_2^2 y_2 + 4 \cdot (1-\lambda_2) \lambda_2^3 y_3 + \lambda_2^4 y_{k-k}; \\
 z_{p2} &= (1-\lambda_2)^4 z_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_2)^3 \lambda_2 z_1 + 6 \cdot (1-\lambda_2)^2 \lambda_2^2 z_2 + 4 \cdot (1-\lambda_2) \lambda_2^3 z_3 + \lambda_2^4 z_{k-k}; \\
 x_{p3} &= (1-\lambda_3)^4 x_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_3)^3 \lambda_3 x_1 + 6 \cdot (1-\lambda_3)^2 \lambda_3^2 x_2 + 4 \cdot (1-\lambda_3) \lambda_3^3 x_3 + \lambda_3^4 x_{k-k}; \\
 y_{p3} &= (1-\lambda_3)^4 y_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_3)^3 \lambda_3 y_1 + 6 \cdot (1-\lambda_3)^2 \lambda_3^2 y_2 + 4 \cdot (1-\lambda_3) \lambda_3^3 y_3 + \lambda_3^4 y_{k-k}; \\
 z_{p3} &= (1-\lambda_3)^4 z_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_3)^3 \lambda_3 z_1 + 6 \cdot (1-\lambda_3)^2 \lambda_3^2 z_2 + 4 \cdot (1-\lambda_3) \lambda_3^3 z_3 + \lambda_3^4 z_{k-k}; \\
 x_{k-k} &= (1-\lambda_0)^4 x_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_0)^3 \lambda_0 x_1 + 6 \cdot (1-\lambda_0)^2 \lambda_0^2 x_2 + 4 \cdot (1-\lambda_0) \lambda_0^3 x_3 + \lambda_0^4 x_{k-k}; \\
 y_{k-k} &= (1-\lambda_0)^4 y_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_0)^3 \lambda_0 y_1 + 6 \cdot (1-\lambda_0)^2 \lambda_0^2 y_2 + 4 \cdot (1-\lambda_0) \lambda_0^3 y_3 + \lambda_0^4 y_{k-k}; \\
 z_{k-k} &= (1-\lambda_0)^4 z_{n-k} + 4 \cdot (1-\lambda_0)^3 \lambda_0 z_1 + 6 \cdot (1-\lambda_0)^2 \lambda_0^2 z_2 + 4 \cdot (1-\lambda_0) \lambda_0^3 z_3 + \lambda_0^4 z_{k-k}.
 \end{aligned} \right\} (9)$$

где x_{pi}, y_{pi}, z_{pi} - координаты точек принадлежащих кривой, описывающей боковую поверхность зуба шестерни по его длине.

3. Выводы

В работе представлена методика расчета исходных данных для выполнения конструкторско-технологической подготовки производства цилиндрических колес с пространственно-модифицированными зубчатыми венцами. Методика заключается в аппроксимации координат контактных точек на боковой поверхности зубьев, полученных в результате профилирования, семейством сплайнов Безье третьего порядка. При этом семейство сплайнов Безье в виде сетки расположены в двух направлениях по длине и по высоте зуба. Густота сетки зависит от требуемой точности решаемых в последствии задач и дискретно задается значениями координат по длине и по высоте зуба шестерни.

Полученные зависимости позволяют определять координаты контактных точек на боковой поверхности пространственно-модифицированного зуба в привязке к сетке сплайнов Безье. Данные, полученные таким образом, могут быть использованы при конструировании для построения трехмерных моделей изделий с пространственно-модифицированными зубчатыми венцами, определении геометрии режущей части инструмента, определении траектории относительного перемещения инструмента и заготовки, а также при контроле изделий с зубчатыми венцами с пространственной геометрией и позволяют сократить сроки выполнения КТПП.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бабичев, Д. Т. Основы концепции синтеза рабочих поверхностей зубьев цилиндрических передач, обладающих заданной контактной прочностью / Д. Т. Бабичев, М. Г. Сторчак, Д. А. Бабичев // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 150-160.
2. Артемов, И. И. Система комплексного обеспечения точности зубчатых колес в условиях автоматизированного производства / И. И. Артемов // СТИН. – 1998. – №6. – С. 8–13.

3. Марков, Н. Н. Проявление кинематической погрешности зубчатых колес под действием нагрузок и скоростей вращения / Н. Н. Марков, И. И. Артемов // Вестник машиностроения. – 1986. – №3. – С. 21-23.
4. Гольдштейн, Г. Я. Стратегический инновационный менеджмент: Учебное пособие / Г.Я. Гольдштейн. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 267 с.
5. Hill C.W.I., Jones G.R. Strategic Management. – Boston: Houghton Mifflin Co, 1992.
6. Медведева, С. А. Основы технической подготовки производства: уч. пособие / С. А. Медведева. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 69 с.
7. Ребрин, Ю. И. Основы экономики и управления производством. Конспект лекций. / Ю. И. Ребрин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ. – 2000. – 145 с.
8. Вотина, Е. Б. Основы технологической подготовки производства : учеб. пособие / Е. Б. Вотина, М. П. Шалимов, А. М. Фивейский.— Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 168 с. – ISBN 978-5-7996-2171-1.
9. Schuh, G. Virtuelle Fabrik: neue Marktchancen durch dynamische Netzwerke. Munchen / G. Schuh, K. Millarg, A. Goransson. – Wien: Carl Hanser Verlag. – 1998. – 160 s.
10. John MacKrell Supporting Collaborative Product Definition via Scaleable, Web-Based PDM.-Prepared by CIMdata,Inc., 2000. – 16 p.
11. Токликишвили, А. Г. Организация технологической подготовки производства на производственных предприятиях / А. Г. Токликишвили, А. Г. Рогулин, О. В. Колесникова, В. Е. Лелюхин // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21346> : 30.06.2018.
12. Романов, В. Ф. Расчет зуборезных инструментов. / В. Ф. Романов. – М.: Машиностроение, 1969. — 251 с.
13. Равська, Н. С. Визначення товщини зрізу при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами зубчатих коліс / Н. С. Равська, О. А. Охріменко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2011. – Вип. №28. – С. 3-12.
14. Андросов, С. П. Уравнение режущих кромок червячной модульной фрезы / С. П. Андросов // Приволжский научный вестник. – 2013. – 2(18). – С.4-7.
15. Отт, О.С. Формирование эвольвентных поверхностей деталей дисковым инструментом / О. С. Отт // Вестник МГТУ Станкин, 2010. – №3. – С. 67-71.
16. Воронцов, Б. С. Математическое обеспечение интерактивного синтеза передач зацеплением / Б. С. Воронцов // Вестник НТУ "ХПИ", 2010. – №27 – С. 49- 54. – ISSN 2079-0791.
17. Грубка, Р. М. Обобщенные зависимости для пространственного соединения цилиндрических зубчатых колес, учитывающие наличие погрешностей и деформаций элементов передач / Р. М. Грубка // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 3(62). – С. 14-22.
18. Грубка, Р. М. Синтез пространственных геометрий зубьев цилиндрических колес, работающих при наличии погрешностей и деформаций элементов передач / Р. М. Грубка, А. П. Недашковский, А. Н. Михайлов, И. А. Петряева, А. А. Байчоров // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Вып. 4(63). – С. 17-27.
19. Белов, В. В. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие / В. В. Белов, И. В. Образцов, В. К. Иванов, Е. Н. Коноплев // Тверь: ТвГТУ, 2015. – 108 с. Режим доступа: <https://www.sunspire.ru/articles/> (дата обращения 5.06.2017).

Поступила в редколлегию 30.03.2022 г.

УДК 669:519.23

Н. А. Гуляев, аспирант, **Е. И. Яровая**, канд. техн. наук, доцент,
И. О. Леушин, д-р техн. наук, проф., **Г. А. Гусев**, студент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Россия
Тел. +7(920)063-49-99; E-mail: gulyaevna@yandex.ru

ФРАКТАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ В ОЦЕНКЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ 20ГЛ

Сталь 20ГЛ, имеющая ферритоперлитовую структуру, содержащая легирующие компоненты Mn и Si, обладает высокими прочностными свойствами и пластичностью, экономически целесообразна для применения во многих отраслях машиностроения. Вследствие низкой теплопроводности и достаточно низкой скорости кристаллизации неизбежны как физическая, так и химическая неоднородности структуры, что влияет на механическую прочность. Предложено проводить оценку качества литых изделий из стали 20ГЛ с использованием элементов фрактальной геометрии, с целью уменьшения трудоемкости и объемов исследований по оценке качества деталей различных конструкций.

Ключевые слова: стальное литье, фрактальный метод, показатели качества, марганцовистая сталь

N. A. Gulyaev, E. I. Yarovaya, I. O. Leushin, G. A. Gusev

FRactal Geometry in Estimation of the Mechanical Properties of Castings from 20GL Steel

Steel 20GL, which has a ferrite-pearlite structure containing alloying components Mn and Si, has high strength properties and ductility, and is economically feasible for use in many branches of mechanical engineering. Due to the low thermal conductivity and a sufficiently low crystallization rate, both physical and chemical inhomogeneities of the structure are inevitable, which affects the mechanical strength. It is proposed to assess the quality of cast products made of 20GL steel using elements of fractal geometry in order to reduce the labor intensity and volume of research to assess the quality of parts of various designs.

Keywords: steel casting, fractal method, quality index, manganese steel.

Основной текст

В машиностроении используются стали обладающие комплексом механических свойств, которые соответствуют определенной ее структуре. В работе рассматривается возможность оперативной оценки механической прочности, исключающая разрушающий контроль и затратные методы определения механических свойств путем применения методов фрактальной геометрии [1], обычно используемые для идентификации сложных объектов различной природы [2 – 4].

Исследовались форма, размер и распределение структурных составляющих в различных участках отливки «корпус подшипника» из стали 20ГЛ ГОСТ 977-88 (масса 16,4 кг, минимальная толщина стенок – 12 мм, максимальная – 55 мм), сформированных при различных скоростях затвердевания (1-3 °C/c и 5 °C/c) на микрошлифах при различных увеличениях. Скорость затвердевания существенно влияет на размер зерен феррита и перлита, что в конечном итоге предопределяет свойства отливки.

Известно, что применимость языка фрактальной геометрии для идентификации структуры металла оправдана там, где существует корреляция между зеренной структурой, ее качественными характеристиками и свойствами самоподобия [1 – 5].

Реальному фракталу в любом масштабе его структуры присущи одни и те же геометрические особенности и масштаб длины l , при отклонении от которого в любую

сторону свойство самоподобия пропадает [9]. Таким образом, свойство самоподобия фракталов рассматривается на масштабах $l_{min} \leq l \leq l_{max}$.

В основе выбора масштаба (l) зеренной структуры, от которой зависят такие свойства как твердость (НВ), временное сопротивление (σ_B), относительное удлинение (δ), для оценки ее фрактальной размерности определяется интервал, в котором соблюдается ее самоподобие и на интервале ($l_{min}:l_{max}$) выбирается единственный масштаб, на котором расчет фрактальной размерности дает наиболее точный результат.

Эмпирически задается шаг Δl – изменение масштаба от l_{min} до l_{max} и вычисляются оценки фрактальной размерности.

$$\begin{aligned} & l_{min} + (l_{min} + \Delta l) + (l_{min} + 2\Delta l) + \dots + (l_{min} + n\Delta l) \\ & n = (l_{max} - l_{min})/\Delta l. \end{aligned} \quad (1)$$

Оптимальным масштабом представления структуры является тот, при котором в двух соседних членах ряда (1) фрактальные размерности имеют минимальные различия, при этом свойство самоподобия структуры соблюдается.

На основе проведенных исследований фотографий микроструктур (рис. 1) было выявлено, самоподобие в указанном интервале масштаба (увеличение структуры стали 20ГЛ от 100 до 1000) при $\Delta l = 100$ сохраняется. Оптимальный масштаб равен $\times 525$, поскольку в двух рядом стоящих масштабах ($\times 500, \times 550$) фрактальные размерности незначительно отличаются между собой (1,76, 1,72 соответственно).

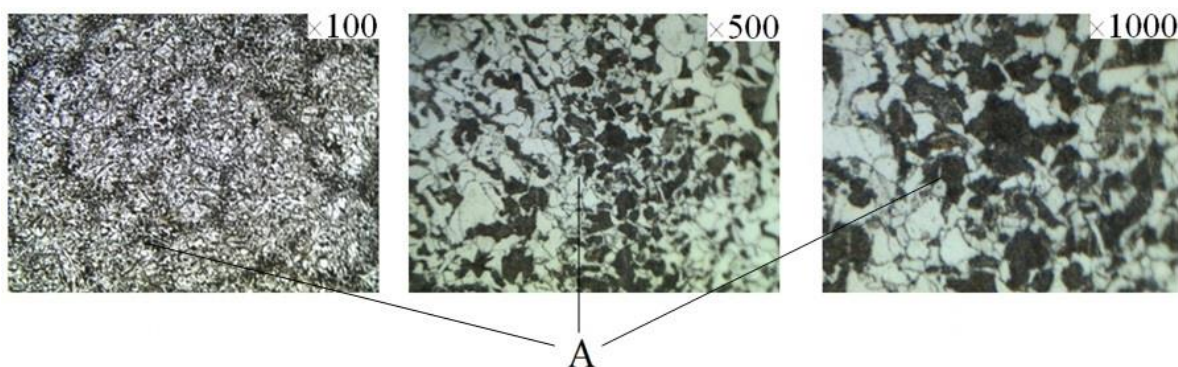


Рисунок 1. Структура шлифа сталь 20ГЛ. (увеличение $\times 100, \times 500, \times 1000$; скорость охлаждения $5^\circ\text{C}/\text{с}$).

Аналогично выбирался оптимальный масштаб на структурах стали 20ГЛ, охлаждаемой при скорости $3^\circ\text{C}/\text{с}$, на микрошлифах с увеличением, соответствующих рисунку 1. Оптимальный масштаб $\times 525$ (фрактальные размерности $\times 500 - 1,72; \times 550 - 1,69$).

Самоподобие структуры можно оценить по одной из характерных геометрических фигур на шлифе, например, фигура А (рис. 1). Соотношение размеров границ этой фигуры при всех масштабах увеличения сохраняется, т.е. самоподобие не нарушено. Структура состоит из множества фаз, каждая из которых имеет свою фрактальную размерность, например феррита, перлита и т.д. Спектр обобщенных статистических размерностей $D(q)$ на интервале $-100 < q < +100$, определенных по формуле (2) [2], приведен на рис. 2.

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^N P_i^q}{\ln \delta}, \quad (2)$$

где δ – ячейка, единичный элемент, которой покрывают исследуемый объект (линейные размеры клетки);

$P_i = P_i(\delta) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i(\delta)}{N}$ – вероятность того, что наугад взятая точка находится в i ячейке, а $n_i(\delta)$ представляет собой количество точек в i ячейке квадратной сетки размером δ ;

$\sum_{i=1}^N P_i^q$ – статистическая сумма, зависит от степени q , которая принимает значения от $-\infty$ до $+\infty$;

N – суммарное количество ячеек, которое занимает объект исследования.

Если $D(q) = D$, т.е. не зависит от q , то исследуемый объект является обычным, регулярным фракталом (монофракталом), который характеризуется всего лишь одной величиной – фрактальной размерностью D . Если функция $D(q)$ меняется с q , то рассматриваемый объект является мультифракталом, а $D(q)$ – показывает, насколько он неоднороден.

Обозначив через $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$ фрактальные размерности, имеем: D_0 - однородный фрактал при $q = 0$; D_1 - информационная размерность, характеризующая скорость роста количества информации, необходимой для определения местонахождения точки на объекте исследования при стремлении δ к нулю.; D_2 - корреляционная размерность при $q = 2$ вероятность нахождения в одной и той же ячейке сетки двух точек на объекте исследования; $D_\infty, D_{-\infty}$ - размерность наиболее разреженного и концентрированного пространства в объекте исследования.

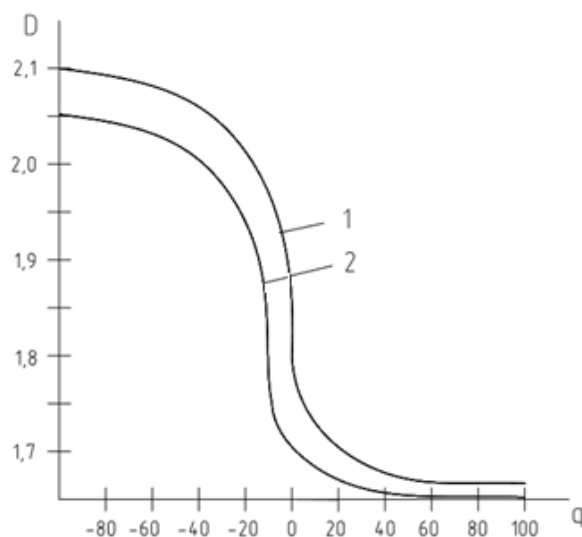


Рисунок 2. Спектр обобщенных статистических размерностей для ферритно - перлитной структуры стали 20 ГЛ на интервале $-100 < q < +100$: 1 – скорость затвердевания $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$; 2 – скорость затвердевания $1-3 \text{ }^\circ\text{C/s}$.

Степень влияния структуры материала на конкретный показатель механических свойств определяет коэффициент чувствительности [1]:

$$K = |y_i - y_{i+1}| / |x_i - x_{i+1}|, \quad (3)$$

где x_i, x_{i+1} – показатели качества в двух контрольных точках; y_i, y_{i+1} – фрактальные размерности элементов структуры в этих точках.

По результатам вычисления K определяются «отсеиваемые» показатели с низкой чувствительностью, тем самым точность прогноза повышается (табл. 1). Кроме того была проведена оценка чувствительности механических свойств образцов к различным фрактальным размерностям из спектра $D_{-100} \dots D_{+100}$. Проведенный анализ показал, что наиболее высокой чувствительностью к форме и размеру зерен феррита обладает размерность D_0 .

Таблица 1. Чувствительность механических свойств к фрактальной размерности D_0 .

Чувствительность	НВ, МПа	σ_B , МПа	δ , %
K	0,14	0,005	0,039

Достаточно высокая чувствительность механических свойств отливки к фрактальной размерности наблюдается для показателя твердости (0,064), а наиболее низкая для временного сопротивления разрыву (0,009), что свидетельствует о влиянии размеров зерен феррита в первом случае больше, во втором – меньше.

Установлен ряд зависимостей механических свойств от формы и размера зерна феррита (рис. 4 (а-в)).

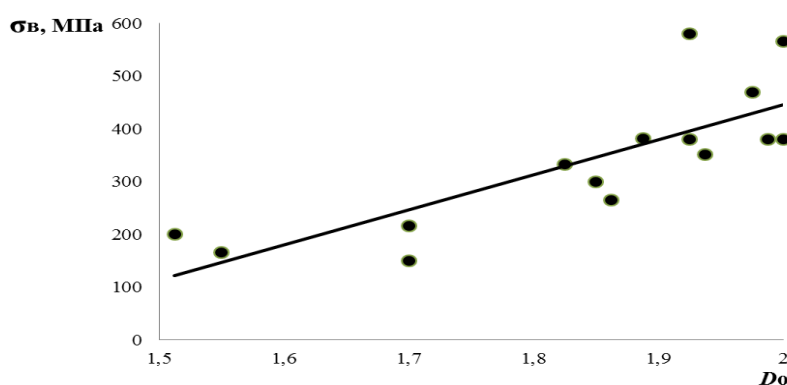


Рисунок 4 (а). Временное сопротивление разрыву (σ_B , МПа)

$$\sigma_B (\text{МПа}) = 663,78D_0 - 881,45 \text{ при коэффициенте достоверности аппроксимации } R^2 = 0,6369 \text{ (коэффициент корреляции } - 0,798)$$

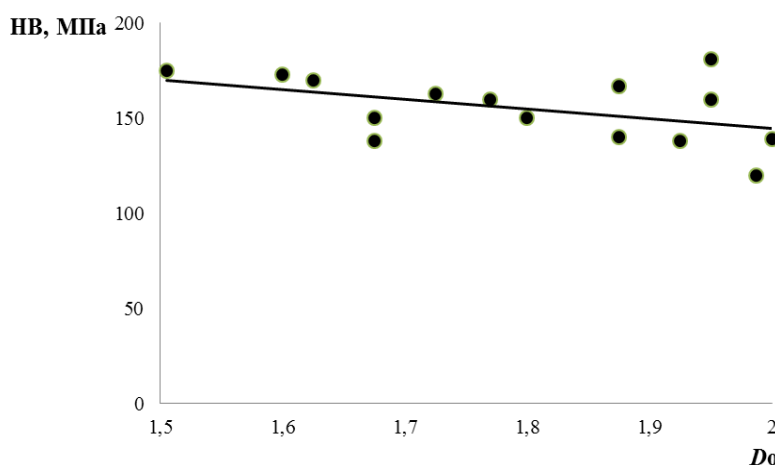


Рисунок 4 (б). Твердость (НВ, МПа) $НВ (\text{МПа}) = -51,408D_0 + 247,25$ при коэффициенте достоверности аппроксимации $R^2 = 0,2145$ (коэффициент корреляции – 0,463)

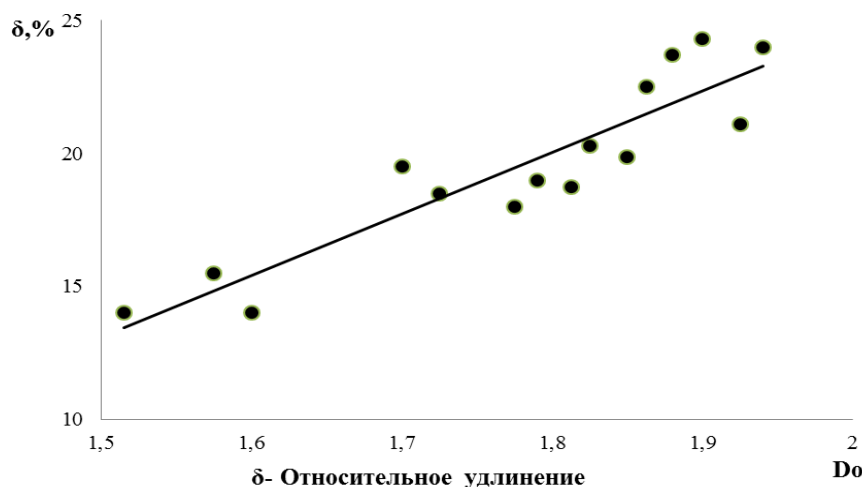


Рисунок 4 (в). Относительное удлинение ($\delta, \%$)
 $\delta(\%) = 23,159D_0 - 21,651$ при коэффициенте достоверности аппроксимации
 $R^2 = 0,8368$ (коэффициент корреляции – 0,914).

Показатели механических свойств при повышении фрактальной размерности феррита с 1,5 до 2, за исключением твердости, увеличиваются.

Выводы

Рассмотрена связь фрактальной размерности структуры стали 20ГЛ с механическими свойствами и скоростью затвердевания отливки. Определены функциональные зависимости между относительным удлинением, твердостью, временным сопротивлением разрыву и размерностью Хаусдорфа–Безиковича (D_0), которые можно использовать при оперативной прогнозной оценке качества металла без проведения дополнительных исследований при наличии фотографий микроструктур.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Большаков, В. И. Основные этапы фрактального моделирования в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2019. – № 2. – С. 24-29.
2. Большаков, В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Матеріалознавство. – 2008. – № 11. – С. 99-107.
3. Волчук В. Н. Мультифрактальный подход при оценке перлитной структуры // Вісник придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2018. – №6. – С. 31-36.
4. Кабалдин, Ю.Г. Оценка фрактальной размерности наноструктур / Ю. Г. Кабалдин, Е. Е. Власов, А. А. Просолович, А. С. Хвостиков. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2014. – №1. – С. 92-97.
5. Штофель, О. А. Метод фрактального анализа для оценки структуры конструкционных сталей / О. А. Штофель // Знание. – 2016. – № 7-1(36). – С. 54-56.

Поступила в редколлегию 05.03.2022г.

УДК 621.0481

Е. Н. Колганова¹, канд. техн. наук, **Е. П. Мельникова**², д-р техн. наук, проф.,
В. А. Лебедев¹, канд. техн. наук, проф., **А. П. Шишкина**¹, канд. техн. наук.

¹Донской государственный технический университет (ДГТУ), Россия

²Донецкий национальный технический университет, ДНР

Тел./Факс: +7 (909) 430-95-99; E-mail: elenkolg@list.ru

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВИБРАЦИОННОЙ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

В статье рассмотрен процесс проектирования технологии вибрационной обработки природными средами. Определены расчетные зависимости для определения массоразмерного соотношения компонентов комбинированной среды. Предложена методика проектирования технологии виброотделки деталей радиоэлектронной аппаратуры с малыми отверстиями и пазами. Предложены технологические рекомендации по практическому применению методики проектирования технологии виброотделки деталей с малыми отверстиями и пазами.

Ключевые слова: технология, вибрационная обработка, детали радиоэлектронной аппаратуры

Y. N. Kolganova, E. P. Melnikova, V. A. Lebedev, A. P. Shishkina

DEVELOPMENT OF VIBRATION FINISHING AND STRIPPING TECHNOLOGY PROCESSING OF ELECTRONIC EQUIPMENT PARTS

The article describes the process of designing the technology of vibration treatment with natural media. The calculated dependences for determining the mass-dimensional ratio of the components of the combined medium are determined. The method of designing the technology of vibration separation of electronic equipment with small holes and grooves is proposed. Technological recommendations on the practical application of the design methodology for the technology of vibration separation of children with small holes and grooves are proposed.

Keywords: technology, vibration processing, details of electronic equipment

1. Введение

Современный этап развития технологии машиностроения характеризуется ростом требований к качеству и надежности изделий, повышению их эксплуатационных свойств. Выпускаемая на сегодняшний день большая номенклатура деталей радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) обусловлена разнообразием их функционального назначения в системах бортовых приборов, используемых в авиационной, корабельной и космической промышленности. Детали РЭА представляет собой тонкостенные осесимметричные изделия, в конструкции которых, для выполнения ими функциональных задач, предусмотрены такие элементы, как пазы и отверстия малого размера, глухие отверстия, отверстия с резьбой. В процессе эксплуатации большинство деталей РЭА подвергаются значительным тепловым, статическим, динамическим, вибрационным нагрузкам и влиянию агрессивной окружающей среды.

Обеспечить предъявляемые высокие требования, касающиеся точности формы, размеров и качества поверхностного слоя возможно на основе совершенствования и разработки эффективных технологий их обработки [1, 2]. В решении указанных задач важное место отводится совершенствованию и развитию финишных методов обработки, представителем которых является отделочно-зачистная обработка, в процессе которой окончательно формируется поверхностный слой деталей, определяющий их эксплуатационные свойства.

В связи с этим разработка технологического процесса удаления заусенцев и подготовки поверхностей под нанесение покрытия деталей радиоэлектронной аппаратуры является актуальной научно-технической задачей.

2. Основное содержание и результаты работы

В настоящее время в отечественной и мировой практике разработан относительно большой арсенал методов удаления заусенцев, использующих абразивные инструменты и среды, гибкие металлические инструменты, лезвийный инструмент, а также методы поверхностного пластического деформирования, ультразвуковую обработку, химические и электрохимические методы. Каждый метод характеризуется своими рациональными областями применения, преимуществами и недостатками [1, 3].

Однако, при всем многообразии способов удаления заусенцев, предпочтение отдаётся тем методам, которые основаны на использовании гибких обрабатывающих сред (объемная обработка). Это обусловлено тем, что гибкая рабочая среда (гибкий инструмент) с точки зрения формообразования является наиболее приемлемой, при этом одновременно принимающие участие в работе большое количество режущих элементов создает условия для высокой производительности [1-7].

Сравнительное исследование финишных операций технологического процесса с применением вибрационной и других существующих методов обработки выявил, что во многих случаях вибрационная обработка наиболее целесообразна и экономична, а также имеет ряд существенных преимуществ технического характера. К основным преимуществам ВиО можно отнести значительное снижение трудоёмкости и себестоимости процесса при обеспечении одновременной обработки всех поверхностей большого количества заготовок.

Особенности деталей РЭА (пазы и отверстия малых размеров, глубокие отверстия, глухие отверстия с резьбой, закрытые с одной или с двух сторон пазы, радиальные отверстия, малая жесткость) вызывают значительные проблемы на операциях отделочно-зачистной обработки. Вибрационная обработка деталей такого типа не нашла отражения в выполненных ранее исследованиях и требует необходимости дальнейшего изучения.

Целью работы является разработка методики расчета технологических параметров вибрационной отделочно-зачистной обработки деталей радиоэлектронной аппаратуры.

Для достижения поставленной цели рассмотрим процесс проектирования технологии вибрационной обработки природными средами на примере обработки деталей «Корпус», которые применяются в узлах приборов РЭА, изготавливаемых и ремонтируемых на ПАО «Завод Атлант», специализированном российском предприятии по разработке и производству электрических соединителей.

После операций формообразования у деталей «Корпус» образуются заусенцы, которые по условиям эксплуатации и требованиям отраслевого ОСТ 4ГО.070.014 не допускаются [6]. В настоящее время в технологическом процессе изготовления деталей «Корпус» на предприятии предусмотрена операция ручной зачистки заготовок.

Предлагается заменить операцию ручной зачистки заготовок на вибрационную отделочно-зачистную обработку с применением природной среды – дробленой скорлупы грецкого ореха.

На основании проведённых исследований разработана методика расчета технологических параметров вибрационной отделочно-зачистной обработки деталей РЭА, представленная в таблице 1.

Таблица 1. – Последовательность расчёта технологических параметров вибрационной обработки деталей РЭА

№	Содержание этапа	Расчётная зависимость	Расчетное значение
1	Анализ качества деталей РЭА	<p>Материал деталей:</p> <p>σ_s - предел текучести материала детали, МПа; ρ_d - плотность материала детали, кг/м³; $Ra_{исх}$ – исходная шероховатость, мкм; H_i – высота заусенца, м; L_o – толщина основания заусенца, м; m_d – масса детали, кг; v_d – объем детали, кг/м³; $\rho_{н.о.д.}$ - насыпная плотность деталей, кг/м³.</p>	<p>$\sigma_s=155$ МПа; $\rho_d=2600$кг/м³; $Ra=0,4$ мкм; $H_i=0,3-0,5$ мм; $L_o=0,2-0,3$ мм.; $m_d=8,6$ гр.; $V_d=1,47 \cdot 10^{-3}$ дм³; $\rho_{н.о.д.}=680$кг/м³</p>
2	Постановка технологической задачи и критериев их обеспечения	<ul style="list-style-type: none"> - отверстия и пазы в детали не требуют обработки; после удаления заусенцев должен быть обеспечен радиус скругления кромок и шероховатость обработанной поверхности, в пределах установленных КД; - отверстия и пазы в деталях требуют обработки; - производительность обработки. 	
3	Выбор технологического оборудования, обрабатывающей и активирующей среды	<p><u>Характеристики вибростанка:</u> Вид рабочей камеры: $V_{р.к.}$ – объем рабочей камеры станка, м³; $L_{ст}$ - высота рабочей камеры, м; L - ширина рабочей камеры в сечении, м; f_V – диапазон частоты колебаний, Гц; A – диапазон амплитуды колебаний, м; <u>Характеристики обрабатывающей среды:</u> Вид обрабатывающей среды; $D_{оп.}$ - диаметр описываемой окружности гранулы, мм; $H_{гр.}$ – толщина гранулы, мм; β – угол при вершине клина гранулы, град; r_β - радиус при вершине клина гранулы, м; $\rho_{ср}$ – насыпная плотность среды, кг/м³; <u>Характеристики активирующей среды:</u> <ul style="list-style-type: none"> - вид активирующей среды; - размер гранул; - плотность гранул; - насыпная плотность среды. <u>Массоразмерные соотношения:</u> $K_r > 1$ - соотношение обрабатывающей среды</p>	<p>$V_{р.к.} = 5$ дм³; $L_{ст} = 0,1$ м; $L = 0,5$ м; $f_V = 15-35$ Гц; $A = 0-4$ мм; $D_{оп.} = 3-6$, мм; $H_{гр.} = 3-6$, мм; $\beta = 30^0$. $r_\beta = 0,15$ мм; $\rho_{ср} = 380$, г/м³;</p>

		и обрабатываемых деталей в общем объеме загрузки; K_V - соотношение объемов обрабатываемой и активирующей сред в общем объеме загрузки	
4	Расчет предельно допустимого количества одновременно обрабатываемых деталей, шт.	$N_{o.d.} = \frac{2V_{p.k.} \rho_{n.o.d.}}{3v_d \rho_d (1 + K_r)}$	128
5	Масса загрузки обрабатываемой среды, кг	$M'_{o.c} = \frac{2V_{p.k.} K_r \rho_{1.c.}}{3(1 + K_r)(1 + K_V)}$	1,328
6	Масса загрузки активирующей среды, кг	$M'_{a.c} = \frac{2V_{p.k.} K_r K_V c_{2.c.}}{3(1 + K_r)(1 + K_V)}$	
7	Оценка возможности обеспечения циркуляционного движения	$A \frac{(2Apf)^2}{g L_{ct}} < 0,5, \quad \frac{L_{ct}}{L} \cong 1; \quad \frac{L_{ct}}{D_{оп}} > 6;$	
8	Определение комплексного коэффициента условий обработки	$M = \frac{c^2 k_\phi}{4pk_d (1 - f^2) ctg \beta \cdot tg \frac{\beta}{2}}$ при $\beta = 28^\circ, k_d \approx 2,75$	0,89
9	Оценка интенсивности обработки	$P_2 = 0,0494 + 0,053K_V - 0,32m_{cp} - 0,0041K_V m_a + 0,0017m_a$	
10	Время обработки (удаления заусенцев), с	$T = M \frac{D_{o.n.}^6 c_{ys}^3 \Delta B}{r_{\beta}^6 c_{cp}^3 A f_V P_2 \sqrt{1 - f^2}} (40k_d^2 A^2 f_V^2 \cos \beta + gL_{ct})^{-3}$	57,94
11	Расчет толщины слоя металла, снимаемого с открытых поверхностей детали за время, требуемое для удаления заусенца	$\Delta B = \frac{r_{\beta}^2 c_{cp} L_o H_i (1 - f^2)^{0.5}}{D_{o.n.}^3 c_{ys}} (40k_d^2 A^2 f_V^2 \cos \beta + gL_{ct})$	0,24
12	Условие годности обработанных деталей	$Ra_{иск} - \Delta B < [Ra_{imin}]$	
13	Производительность обработки, шт/с	$\Pi_p = \frac{N_{o.d.}}{T}$	0,035
14	Технологические параметры ВиО деталей РЭА	$A, f_V, T, N_{o.d.}, M_{o.c.}, M_{a.c.}$	

3. Общий алгоритм и рекомендации

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм, включающий в себя ряд взаимообуславливающих функциональных блоков, реализующих процесс проектирования операций и разработку на этой основе наиболее рациональной технологии отделочно-зачистной обработки деталей с малыми пазами и отверстиями, обеспечивающей требуемое по условиям эксплуатации качество.

Рассмотрим основные задачи, решаемые функциональными блоками алгоритма проектирования технологии ВиО деталей (рис. 1).

1. Операторы 1, 2 осуществляют анализ и ввод исходных данных для проектирования, в качестве которых, выступают:

а) параметры, которые не меняются в процессе обработки: конструктивные параметры обрабатываемой детали: её геометрическое и размерное описание, материал и механические свойства, вес, размеры и форма заусенцев;

б) параметры, которые должны выбираться для реализации технологической задачи: условия проведения процесса (режимы обработки), тип оборудования, гранулометрические характеристики рабочей среды;

2. Оператор 3 определяет гранулометрические характеристики обрабатывающей среды по зависимостям (таблица 1);

3. Оператор 4 для выбранных условий виброобработки проводит проверку проникающей способности гранулы обрабатывающей среды. Проверка осуществляется по неравенствам, предложенным в таблице 1;

4. Оператор 5 устанавливает предельно допустимое количество деталей, загружаемых в рабочую камеру станка, а также массоразмерное соотношение загрузки (таблица 1);

5. Оператор 6 проводит расчет продолжительности вибрационной обработки до обеспечения заданных параметров качества поверхности (таблица 1) или фиксирует выбранное время обработки;

6. Оператор 7 проводит оценку изменения высоты микропрофиля поверхности детали за время удаления заусенцев;

7. Оператор 8 проводит сравнение допустимого условия, свидетельствующего о годности качества поверхности детали после ВиО. В случае, если условие не выполняется, то цикл обработки возвращается к оператору 2, осуществляющему варьирование изменяемых параметров (время обработки, амплитуда, частота);

8. Оператор 9 определяет производительность обработки (таблица 1);

9. Оператор 10 проводит сравнение расчетной производительности с заданной технологическими условиями изготовления детали. В случае, если значение производительности не соответствует, то цикл обработки возвращается к оператору 2, предлагающему применение комбинированной обрабатывающей среды для интенсификации процесса;

10. Оператор 11 производит выбор тех значений параметров обработки, при которых производительность будет максимальной;

11. Оператор 12 выводит на печать технологический регламент обработки детали на данной операции;

Представленный алгоритм позволяет обоснованно спроектировать рациональный технологический процесс виброобработки деталей РЭА с использованием САПР ТП.

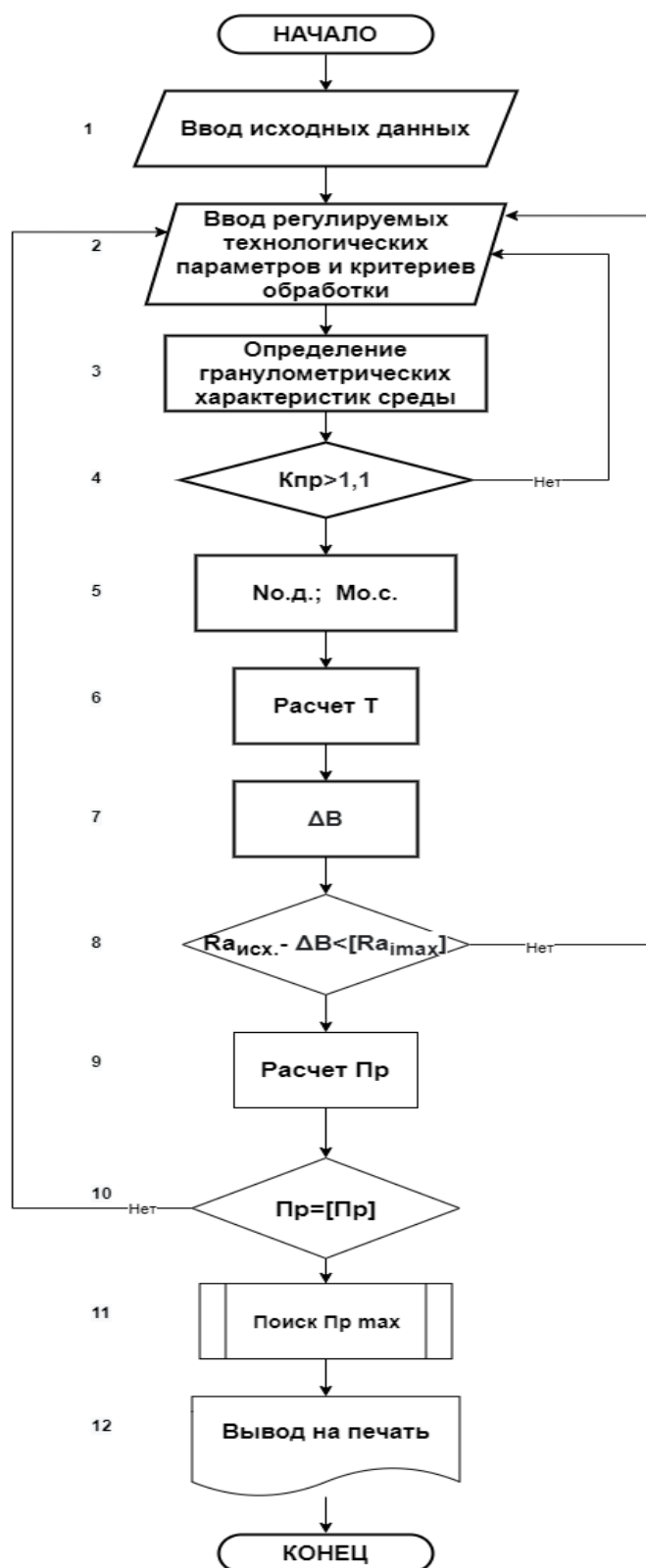


Рисунок 1. Алгоритм проектирования технологии ВиО деталей РЭА

4. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Определить расчетные зависимости для определения массоразмерного соотношения компонентов комбинированной среды.
2. Разработать методику проектирования технологии виброотделки деталей с малыми отверстиями и пазами.
3. Разработать технологические рекомендации по практическому применению методики проектирования технологии виброотделки деталей с малыми отверстиями и пазами.

Результаты проведенных исследований и предложенные для практического применения технологические рекомендации отделочно-зачистной обработки деталей на основе комбинирования обрабатывающих сред позволяют повысить эффективность вибрационной обработки, а также завершить цикл отделки деталей путем доведения их качества до уровня, предусмотренного конструкторско-технологической документацией.

Внедрение виброобработки в гранулированных природных средах на примере деталей радиоэлектронной аппаратуры в условиях приборостроительного завода ПАО «Завод Атлант», г. Изобильный, позволило повысить производительность отделочно-зачистных операций в 5-10 раз и обеспечить заданное качество обработки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тамаркин, М. А. Повышение эффективности вибрационной обработки путем комбинирования обрабатывающих сред / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, Ю. В. Корольков, В. М. Троицкий // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 6(120). – С. 12-17. – DOI 10.30987/2223-4608-2021-6-12-17. – EDN VTCTWS.
2. Тамаркин, М. А. Обоснование гранулометрических характеристик рабочей среды при вибрационной обработке деталей с малыми пазами и отверстиями / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, М. А. Ягмуров // Advanced Engineering Research. – 2020. – №20(4). – С. 382-389.
3. Бабичев, А. П. Основы вибрационной технологии / А. П. Бабичев, И. А. Бабичев. – Ростов н/Д: Изд. Центр ДГТУ, 1998 – 624 с.
4. Тамаркин, М. А. Эффективность применения гранулированных сред из природных материалов для виброотделки деталей радиоэлектронной аппаратуры / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, В. А. Лебедев, А. П. Шишкина // Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 4. – № 4(38). – С. 59-69. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-59-69. – EDN LTQYNQ.
5. Колганова, Е. Н. Технологическое обеспечение вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия : дис. ... канд. техн. наук / Е. Н. Колганова: Ростов н/Д, 2022. – 169 с.
6. Отраслевой стандарт ОСТ 4 ГО.070.014. Детали радиоэлектронной аппаратуры. Общие технические условия.
7. Антонова, Н. М. Адгезия вибрационного механохимического твердосмазочного покрытия MoS₂. / Н.М. Антонова, В. С. Шоркин, С. Н. Ромашин, А. П. Бабичев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – № 9. – С. 67-74. – DOI: 10.1134/S0207352819070023

Поступила в редколлегию 23.03.2022 г.

УДК 622.23.05

А. А. Мартюшова, аспирант

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", Россия

Тел.: +7(926)141-80-34, E-mail: nastyamartyushova@mail.ru**ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СОЕДИНЕНИЯ
«НИППЕЛЬ АЛМАЗНОГО ДОЛОТА – ПЕРЕВОДНИК» ПРИ СБОРКЕ**

В статье представлен анализ соединения «ниппель алмазного долота и переводника», проанализирована последовательность сборки. Выявлены условия сборки, с учетом методики расчета сопряжения конических поверхностей, влияющие на формирование позиционной точности элементов конструкции бурового инструмента.

Ключевые слова: сборка, размерный анализ, алмазное долото, ниппель, переводник

A. A. Martyushova, PhD students**IDENTIFICATION OF THE CONNECTION CONDITIONS OF THE "NIPPLE OF THE DIAMOND BIT – TRANSLATOR" DURING ASSEMBLY**

The article presents an analysis of the connection of the "nipple of a diamond chisel and a translator", the assembly sequence is analyzed. The assembly conditions are revealed, taking into account the method of calculating the interface of conical surfaces, affecting the formation of positional accuracy of the structural elements of the drilling tool.

Keywords: assembly, dimensional analysis, diamond chisel, nipple, adapter

Введение

Повышение технического уровня горного машиностроения может быть достигнуто на основе внедрения высокоэффективных технологических процессов, а также комплексной автоматизацией этапов изготовления машин и горного инструмента. Эффективность работы механизма зависит от точного проектирования, изготовления деталей, от верной сборки составляющих и др.

Основой конструирования сборочных единиц является назначение допусков относительного положения сопрягаемых поверхностей деталей и правильного взаимобазирования [4]. Контроль за соблюдением данных требований возможен с помощью методики размерного анализа. Размерный анализ сборочной единицы представляет собой систему взаимосвязанных размеров, благодаря которым появляется возможность определить погрешности установки и относительного взаимоположения деталей.

Размерный анализ можно представить, как последовательность действий, представленных на рисунке 1 [5]. Методика размерного анализа позволяет выявить и решить возможные ошибки на этапе конструирования. Такая оценка всегда связана с анализом соответствия геометрических форм деталей, их размеров, допусков, относительного положения и др.

Рассмотрим возможность реализации сборки соединения «алмазное долото – переводник» с помощью размерного анализа.

Условия соединения «Ниппель алмазного долота – переводник»

Алмазное долото выступает в качестве породоразрушающего инструмента и является продуктом массового производства, несмотря на свою сложную конструкцию. Для механической обработки составных элементов конструкции горного инструмента

широко применяются металлорежущее оборудование с числовым программным управлением, а также средства автоматизированного контроля. Вместе с тем, сборку изделий, как правило, осуществляют вручную [1-2].



Рисунок 1. Последовательность действий при размерном анализе.

Эскиз соединения алмазное долото – переводник, представлен на рис. 2. Сам инструмент можно представить в виде двух частей: корпус долота и приваренный к нему ниппель. Ниппель присоединяется к переводнику, который служит связующим элементом буровой установки между бурильными трубами, между трубами и самим породоразрушающим инструментом [6].

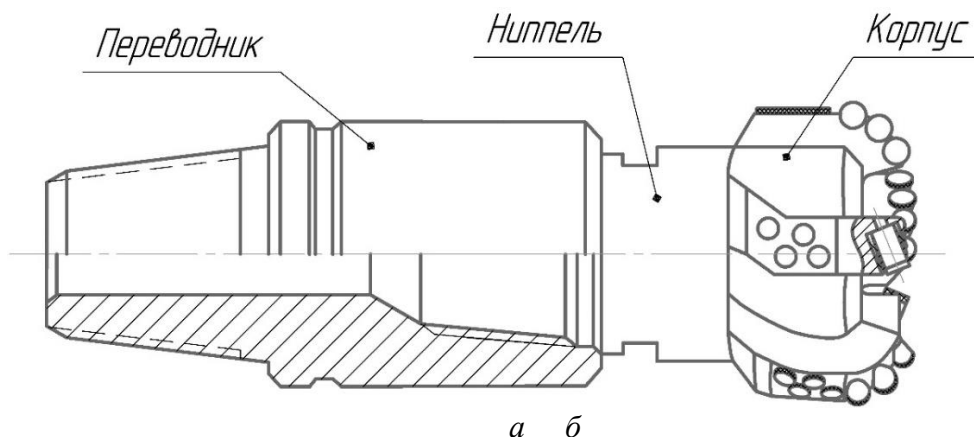


Рисунок 2. Эскиз соединения ниппель алмазного долота и переводника.

Важную нагрузку в процессе бурения несет на себе переводник, так как некачественная сборка целостно влияет на работоспособность инструмента и скорость породоразрушения.

Сборка рассматриваемой сборочной единицы требует совмещения координатных осей инструмента и переводника по конической составляющей. Размеры сопрягаемых поверхностей требуют высокую точность изготовления для получения правильного относительного положения во время сборки.

На рис. 3 представлена последовательность соединения ниппеля долота и переводника, из которой видно, что погрешность установки уменьшается по мере сопряжения деталей до совмещения координатных осей. В процессе исследования сборки ниппеля долота и переводника учет резьбового соединения был опущен для упрощения математической части.

Движение присоединяемой детали, в нашем случае алмазного долота, при выполнении сопряжения можно рассматривать как плоскопараллельное движение твердого тела, а контакт сопрягаемых поверхностей как контакт двух твердых тел, при котором пластические деформации недопустимы, так как это может привести к повреждению сопрягаемых поверхностей. При выполнении первого этапа сопряжения фаска ниппеля может скользить по фаске сопрягаемой поверхности переводника. Вторым этапом соединения выступает выравнивание поверхностей сопряжения между собой и постепенное уменьшение угла перегиба [3].

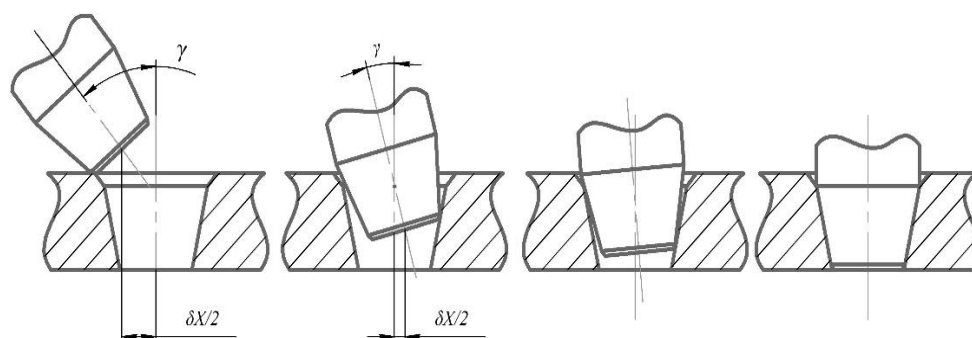


Рисунок 3. Последовательность соединения ниппеля долота и переводника.

На рис. 4 представлены условия обеспечения соосности соединения ниппеля долота и переводника.

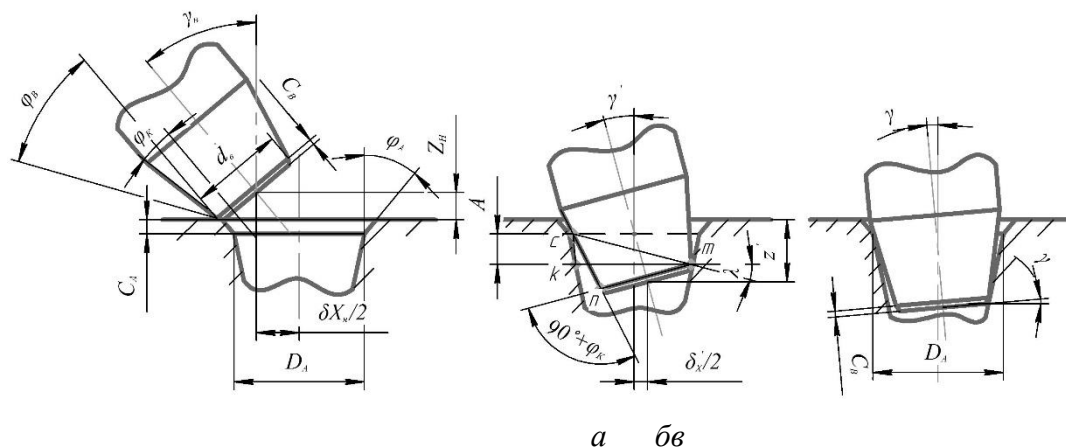


Рисунок 4. Условия сборки ниппеля долота и переводника.

Самым неблагоприятным моментом является сопряжение фасок деталей между собой, при этом допуск относительного положения в этом случае (рисунок 4а) можно найти по следующей формуле:

$$\frac{\delta X_H}{2} = 0,5 D_A + C_A \operatorname{tg} \varphi_A - 0,5 d_B + C_B \operatorname{tg} \varphi_B, \quad (1)$$

где D_A — наибольший диаметр отверстия переводника;
 $C_A, \varphi_A, C_B, \varphi_B$ — размеры фасок ниппеля и переводника;
 d_B — наименьший диаметр ниппеля долота.

Угол γ определяет взаимное расположение осей соединения, а угол γ_H определяет наклон присоединяемой детали. Важно отметить, что при сборке узла механизма должно соблюдаться условие $\gamma > \gamma_H$ для избежания заклинивания.

Соединение, представленное на рисунке 4б, показывает, что достичь необходимой точности относительного положения сопрягаемых деталей можно путем анализа и расчетов треугольников cmn и kcm :

$$\gamma = -\varphi_H - \lambda + \arccos \frac{(d_B \cos \varphi_H \sin \lambda)}{A}, \quad (2)$$

где φ_H — угол смещения осей ниппеля долота и переводника от требуемой соосности.

Угол λ является углом треугольника cmk и находится по формуле:

$$\lambda = \operatorname{arccctg} \left[-\operatorname{tg} \varphi_H + \left(\frac{D_A}{A} \right) \right] \quad (3)$$

Значение A является кратчайшим расстоянием от фаски переводника до наименьшего диаметра ниппеля долота:

$$A = -z' - C_A - 0,5 d_B \sin |\gamma'| - C_B \cos \gamma' \quad (4)$$

Частные показатели угла γ можно вывести из формулы 2.

Для получения наиболее точностных значений, можно использовать формулу 2. Размер z' является расстоянием от поверхности переводника до оси наименьшего диаметра ниппеля и находится по формуле:

$$z' = -(C_A + 0,5 d_B \sin |\gamma'| + C_B \cos \gamma') \quad (5)$$

Если значение $z' = L_p$, то угол γ будет равен нулю, в данном случае L_p является длиной посадочной поверхности переводника [4].

Данный размерный анализ показывает, что последовательная сборка соединения возможна при соблюдении двух условий: $\gamma > \gamma_H$ и $z' = L_p$.

Заключение

Соединение ниппель долота и переводник можно считать одной из составляющей буровой установки. Сборка рассматриваемого соединения чаще всего осуществля-

ется вручную, поэтому важным моментом является правильное изготовление элементов во избежание заклинивания. Правильный расчет сборочной единицы с помощью размерного анализа в процессе конструирования позволяет провести сопряжение элементов соединения с минимальной погрешностью. Техническая целесообразность анализа погрешности установки ниппеля долота в переводник позволяет предупредить возможные поломки и увеличить срок эксплуатации долота.

На основе анализа последовательности сборки ниппеля долота и переводника представлены основные условия обеспечения соединения, с учетом формируемых погрешностей относительного положения сопрягаемых элементов соединения. Также выявлена необходимость проведения исследовательских работ в направлении анализа сборки конических резьбовых соединений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богомолов, Р. М. Буровое долото с алмазными резцами. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море / Богомолов Р. М., Гринев А. М., Сериков Д. Ю. – 2019. – № 12. – С. 28-34.

2. Марамзин, А. В. Алмазное бурение на твердые полезные ископаемые. Технология работ / Марамзин А. В., Блинов Г. А. Л. – «Недра», 1977. – 248 с.

3. Проектирование технологии: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / И. М. Баранчукова, А. А. Гусев, Ю. Б. Крамаренко и др.: под общ. ред. Ю. М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. – 416 с.: ил. (Технология автоматизированного машиностроения).

4. Технология автоматической сборки / А. Г. Холодкова, М. Г. Кристаль, Б. Л. Штриков и др.: под ред. А. Г. Холодковой. – М. Машиностроение, 2010. – 560 с.:ил.

5. Рахимов, А. А. Сравнительный анализ отработки алмазных и шарошечных долот / Рахимов А. А., Эшонкулов К. Э., Жураев Ш. Н. // Вестник науки и образования. – 2021. – № 17-3 (120). – С. 17-20.

6. Нескоромных, В. В. Разработка алмазного бурового долота для направленного бурения / Нескоромных В. В., Петенёв П. Г., Лысаков Д. В., Попова М. С., Головченко А. Е., Лиу Б. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 116-125.

Поступила в редколлегию 24.03.2022 г.

УДК 621.01

А. Н. Михайлов¹, д-р техн. наук, проф., Б. С. Котляров², канд. техн. наук,
В. Б. Котляров¹, аспирант, С. Б. Котляров¹, соискатель

¹ Донецкий национальный технический университет

² Москва, Россия

Тел: +7(988)-55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 70-45-362;

E-mail: mntk21@mail.ru; boris.kotlyarov@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ПО УЧАСТКАМ И ЗОНАМ ПРОФИЛЯ ТРУБЫ МАСЛООХЛАДИТЕЛЯ

В работе приведены результаты исследований, проведенных на основе анализа общего функционала детали – трубы маслоохладителя с распределением частных функций на различных участках. Разработана методика определения локализации каждого участка и зоны профильной трубы в общей системе координат детали при установлении связи с частными системами координат каждого профиля. Установлена связь функциональных целевых задач участков и зон с функционально-ориентированными свойствами, и с привязкой к ФОТ-воздействиям элементов технологической системы по обеспечению заданных ФОС детали. Приведена классификация зон и участков детали, а также разработана система формализованной записи, позволяющая увязать конструктивные признаки детали и технологические особенности инструментов.

Ключевые слова: медная труба, оребрение, система координат, ФОТ-воздействие, функционально-ориентированные свойства, инструменты, формализация записи, локализация участков и зон, профиль.

A. N. Mihailov, B. S. Kotlyarov, V. B. Kotliarov, S. B. Kotliarov

LOCALIZATION OF FUNCTIONAL-ORIENTED PROPERTIES BY SECTIONS AND ZONES OF OIL COOLER PIPE PROFILE

The paper presents the results of studies conducted on the basis of the analysis of the general functionality of the oil cooler pipe part with the distribution of particular functions in various sections. A method has been developed for determining the localization of each section and zone of the profile pipe in the general coordinate system of the part when establishing a connection with the particular coordinate systems of each profile. The connection of functional target tasks of sites and zones with functionally oriented properties, and with reference to the PHOTO effects of the elements of the technological system to ensure the specified FOS of the part is established. The classification of zones and sections of the part is given, and a system of formalized recording is developed that allows linking the design features of the part and the technological features of the tools.

Keywords: copper pipe, finning, coordinate system, FOT-impact, functionally oriented properties, tools, record formalization, localization of sites and zones, profile.

1. Введение

Общая целевая функция всей детали определяет набор частных целевых функций для каждого участка и зоны детали. При этом целевая предназначенность каждого участка имеет свои особенности, которые выражаются ФОС - функционально-ориентированными свойствами, обеспечивающими исполнение эксплуатационных функций каждым участком и деталью в целом. Различие свойств участков и зон, принадлежащих геометрическим формам и поверхностям деталей, предполагает приложение различных технологических воздействий с целью формирования этих свойств [1, 2, 3].

В работе рассматриваются назначение элементов и поверхностей детали с учетом приемлемой структуры материала, и необходимые свойства этих элементов,

которые могут обеспечить функционирование детали для выполнения эксплуатационной задачи.

Назначение детали для выполнения заданных функций в механизме или машине определяет придание тех или иных свойств, обеспечивающих в конечном счете выполнение возложенных на механизм задач.

Проведены исследования возможных способов создания требуемых свойств для ограниченных участков и зон профилированной трубы маслоохладителя, локализацию которых определенным образом можно определить в общей системе координат детали и зафиксировать путем формализованной записи.

2. Цель и задачи

Целью настоящей работы является определение функционально-ориентированных направленных технологических воздействий, применимых для формирования заданных свойств детали отдельных участков и зон детали путем реализации обработки холодной объемной и поверхностной пластической деформации - ХОППД.

Для достижения цели работы решен ряд частных конкретных технических задач.

1. Установить эксплуатационные принципиально важные функциональные особенности элементов поверхностей профиля оребренной трубы.

2. Определить и зафиксировать формальную связь атрибутов и конструктивных качественных показателей готовой детали физико-механическими и иными свойствами элементов и поверхностей трубы.

3. Установить и формализовать связь свойств элементов и поверхностей детали с технологическими аспектами инструментального обеспечения процесса накатки и свойствами технологической системы, включая кинематические цепи системы образования требуемой геометрии и поверхностных свойств.

4. Разработать порядок формализованной записи связей конструктивных свойств и признаков, частей, участков и зон деталей с технологическими аспектами ФОРТ-систем для реализации необходимых ФОРТ-воздействий.

3. Основное содержание и результаты работы

Техническая система, включающая в себя машину для выполнения определенной работы, технологическую систему для ее изготовления, объект труда и систему утилизации отработавшей машины, имеет общую техническую линию, определяемую первоначальным замыслом, вызванным развитием технического прогресса [4]. В частном случае рассмотрения технической системы, предназначенной для создания оребренных труб маслоохладителя, получаемого путем накатки витков винтообразного профиля на цельной медной трубе [5, 6], в цепь технической системы включаются следующие составляющие элементы:

- объект труда – цельная медная труба-заготовка;
- технологическая система в составе инструментального обеспечения, энергетического привода и вспомогательного оснащения.

Систему утилизации на данном этапе не рассматриваем. Подробно рассматриваем технологическую систему обеспечения профилирования.

Состав технологической системы оребрения цельной медной трубы путем накатывания профиля роликами представлен на рис. 1, на котором отражено наличие объекта обработки, инструмента, энергетического обеспечения кинематической цепи и динамического взаимодействия элементов системы.

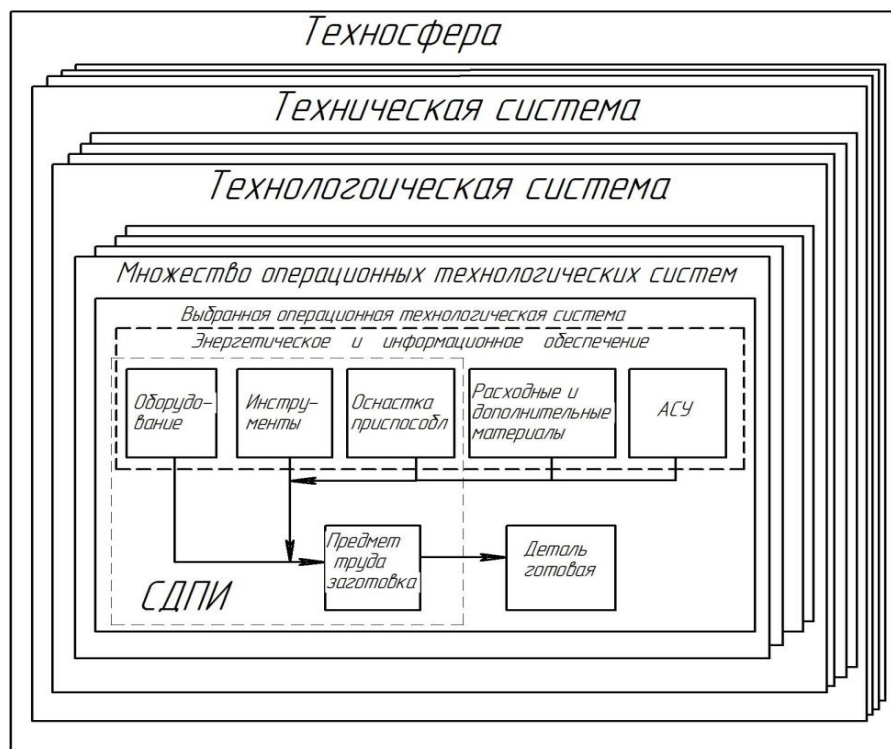


Рисунок 1. Схема организации операционной технологической системы накатки труб

В общей техносфере существует множество технических систем, каждая из которых включает множество технологических систем различного назначения. В составе технологической системы оребрения имеется несколько операционных систем, позволяющих достичь технического результата в формировании геометрии и свойств, в некотором приближении удовлетворяющего требуемым эксплуатационным характеристикам готовой детали. Путем рекуррентного итеративного выбора определена операционная технологическая система для изготовления оребренных труб маслоохладителя методом накатки цельной медной трубы-заготовки головкой с роликами, размещенными на скрещенных осях методом ХОППД.

Выбранная из установленного множества вариантов ФОР-воздействий технологическая система для осуществления оребрения медной трубы раскладывается для детального исследования на элементы СДПИ с приведением энергетического, информационного, управленческого обеспечения. Это ФОР-система профилирования цельной трубы без снятия стружки методом ХОППД, состав которой более детально представлен на рис. 2 с указанием придания кинематических воздействий отдельным элементам системы.

Основой технологической системы для профилирования принят станок токарно-винторезный ДИП-300. На станине станка установлено приспособление в качестве опорной системы для крепления головки накатной, в которой размещены три накатных ролика на скрещивающихся под углом 3 градуса осях. Ролики комплектным набором на шпонках размещены в подшипниковых узлах под углом 120 градусов в поперечной плоскости головки. Вращение осей передается от патрона через узел шестерен и карданов, расположенных на опоре приспособления. Осевая подача осуществляется суппортом станка через упор на заданный размер трубы и соответствующую длину

хода, а первичное центрирование и поддержка трубы в процессе накатки на станке обеспечивается дорном, размещенным на струне, закрепленной в пиноли задней бабки станка.

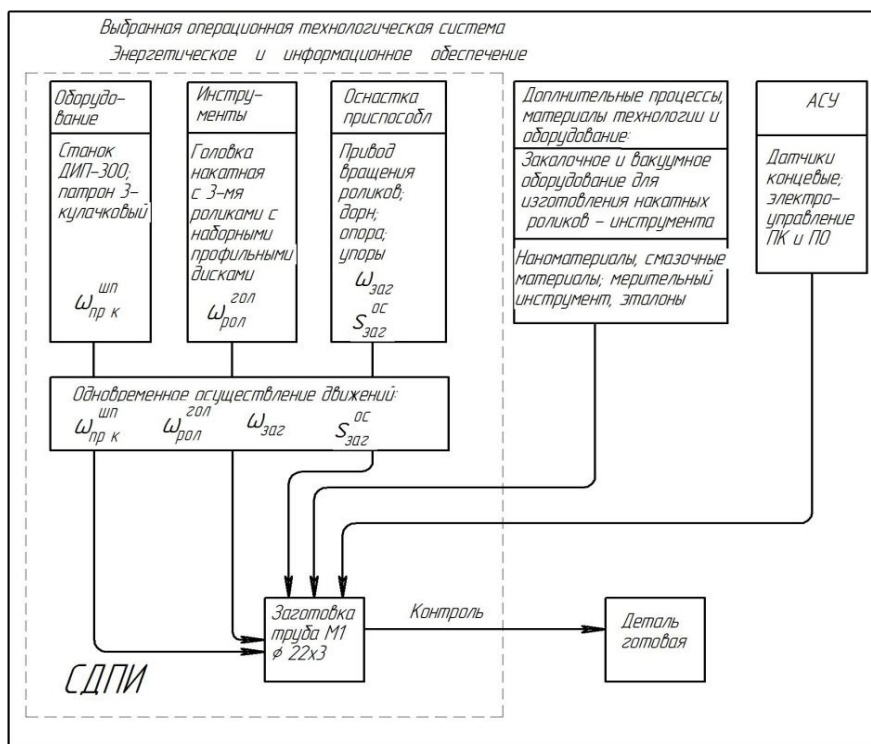


Рисунок 2. Выбранная схема ФОТ-системы накатки профиля медной трубы маслоохладителя

Подвижными элементами рассматриваемой ФОТ-системы профилирования являются следующие детали и узлы, описание которых приведено в табл. 1.

Вращение со скоростью $\omega_{рол}$ на накатные ролики передается зубчатой передачей от центральной шестерни, установленной в патроне станка через 3 зубчатых колеса. Зубчатые колеса установлены в подшипниковых узлах опоры, а три карданных вала крепятся болтовым соединением к торцам зубчатых колес, размещенных в подшипниках, с возможностью осевого перемещения относительно осей роликов для компенсации люфтов карданных валов при их вращении.

Заготовка в процессе накатывания осуществляет сложное винтовое движение за счет передаваемого вращения от роликов и осевой подачи суппорта станка. Вращение со скоростью $\omega_{заг}$ происходит вследствие врезания роликов в металл трубы, при этом за счет трения поверхности роликов и поверхности трубы в местах контакта создается усилие выдавливания металла в направлении, нормальном к поверхности контакта трубы. При вращении роликов одновременно возникает тангенциальная составляющая на контактной поверхности трубы, которая приводит трубу во вращательное движение вокруг оси.

Продольное линейное движение трубы со скоростью $V_{заг}^{oc}$ осуществляется за счет ходового винта и кинематической схемы станка, обеспечивающей осевую шаговую подачу трубы, которая определяется шагом винтовой линии профиля.

Таблица 1. – Подвижные элементы ФОТ-системы, виды движений и состав кинематических цепей.

Подвижный элемент	Вид осуществляемого движения	Цепь передачи движений	Примечание
Ролики	Вращательное $\omega_{рол}$	Патрон станка - зубчатая передача - карданная передача - ось ролика	Привод от двигателя станка
Заготовка	Вращательное $\omega_{заг}$	Ролики - заготовка От роликов посредством триботехнического взаимодействия	Силы трения при неизменном осевом расстоянии
	Продольное $V_{заг}^{oc}$	От суппорта - упор - с центрированием по дорну	С подачей на шаг винтовой линии
Дорн	Вращательное $\omega_{дорн}$	Заготовка - дорн От роликов посредством триботехнического взаимодействия внутренней поверхности трубы и наружной поверхности дорна	Силы трения при деформировании заготовки и уменьшения внутреннего диаметра трубы в процессе накатки

Вращательное движение дорна не влияет на шаг винта и может осуществляться только за счет сил трения, возникающих в контакте трубы и дорна при деформировании стенок трубы с уменьшением толщины сплошной стенки и с уменьшением внутреннего диаметра трубы в процессе перемещения объемов металла при накатке профиля и соответствующем профилировании трубы маслоохладителя. Дорн обеспечивает своими геометрическими размерами сохранение размера внутреннего диаметра оребренной трубы в заданных пределах полей допусков. Графически кинематическая схема технологической системы накатки ребер представлена на рис. 3.

Последовательность передачи вращения от патрона станка ДИП-300 на ролики видна из расположения всех промежуточных элементов кинематической цепи. Вся цепь включает промежуточные зубчатые колеса $Z_{к(1,2,3)}$, воспринимающие вращательное движение $\omega^{виз}$ от установленной в патроне станка шестерни и соединенные карданными валами с осями накатных роликов, которые теперь имеют вращение $\omega_{р(1,2,3)}$. Опорные элементы конструкции на рисунке не указаны. Показано дополнительное соединение карданов с осями роликов, примененных с целью компенсации биения, полученного вследствие углового размещения осей вращения роликов относительно осей вращения зубчатых колес. Компенсация осуществляется путем осевого перемещения опор карданных вилок относительно осей роликов.

Важнейшим элементом технологического обеспечения процесса накатки является конечный рабочий орган системы – инструмент. Это накатная головка с накатными роликами, которые и формируют окончательный профиль оребренных труб. Ранее в работах авторов рассмотрены нюансы процесса формообразования геометрии профиля оребрения [6], относящиеся к решению вопроса локализации перемещаемых масс металла заготовке в процессе формирования геометрии профиля оребрения. Следует отметить, что необходимо отдельно рассмотреть вопрос формирования профиля самих накатных роликов в части геометрии и поверхностных свойств более подробно.

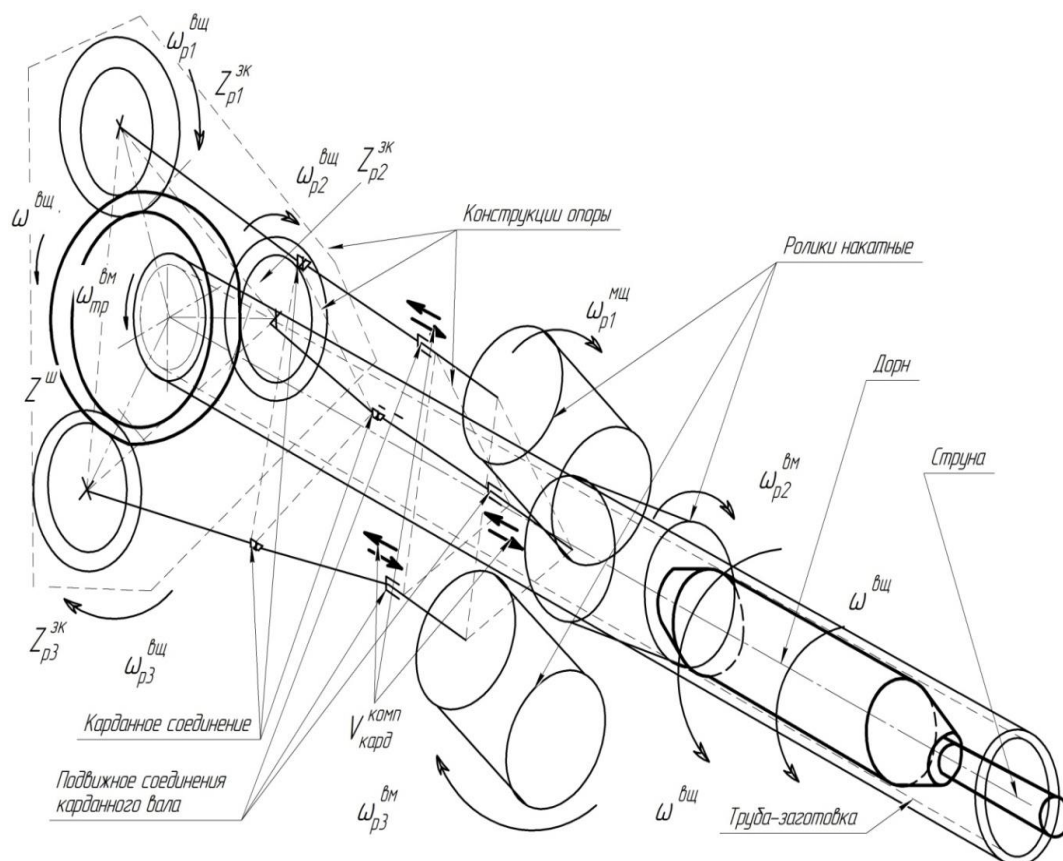
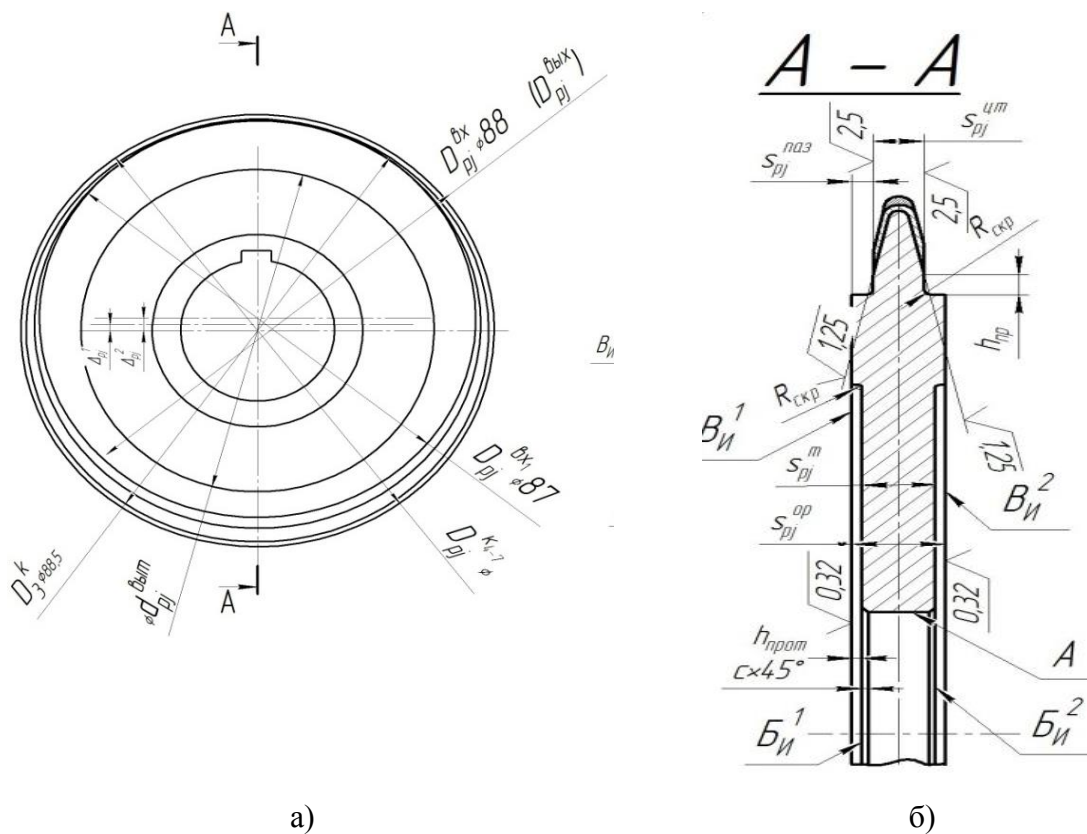


Рисунок 3. Кинематическая схема устройства оребрения труб маслоохладителя накаткой

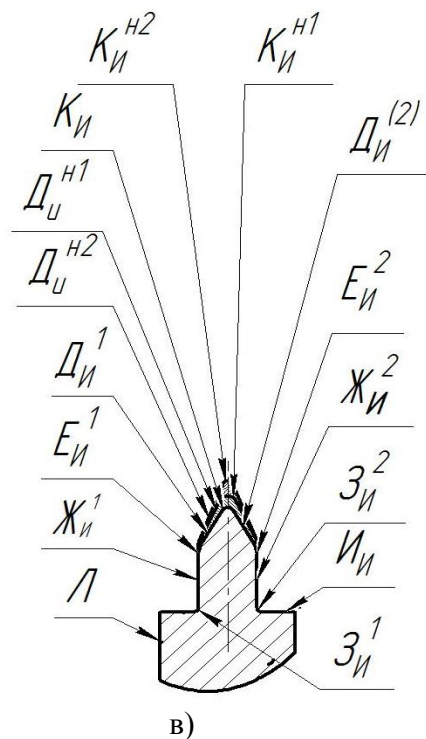
На рис. 4 приведен комплект роликов (рис. 4, а), и профиль ролика (рис. 4, б, в), где литерами русского алфавита указаны основные опорные поверхности (А, В), основные и вспомогательно-переходные поверхности (Б), сохраняющие геометрию изделия, и функционально ориентированные поверхности, предназначенные для профилирования оребрения трубы. При этом профилирующие поверхности разделены по переходным зонам с учетом различной нагрузки и обратной реакции при формировании разных зон профиля. Эти зоны поверхностей роликов выполняются с различными ФОС, в данном случае отличающиеся чистотой обработанной поверхности и твердостью поверхностного и подповерхностного слоя материала роликов. Наиболее нагруженная зона профиля формообразующих роликов является вершина профиля. Именно в этой зоне прилагаются максимальные усилия воздействия на материал трубы при перемещения масс в другие зоны профиля оребрения.

При этом для зоны первичного контакта вершины ролика с материалом трубы, который подвержен вытеснению и переносу в другие зоны профиля, предусматривается повышение твердости и износостойкости путем нанесения твердого покрытия – рис. 4, в.



а)

б)



в)

Рисунок 4. Профиль ролика накатного.

а - вид в плане – комплект роликов; б - сечение профиля ролика с упрочненным слоем;
в - послойное напыление карбида титана на вершине ролика.

Важным моментом при реализации накатки при вращающихся роликах является обеспечение самозахвата трубы-заготовки роликами и придания вращения в процессе формирования профиля при одновременной осевой подаче с шагом винтовой линии профиля вдоль оси вращения трубы. Такой захват обеспечивается конструктивным исполнением первых двух роликов комплекта, наружный диаметр которых в некоторой угловой зоне диска заборного ролика. Диаметр ролика в этой зоне выполняется с занижением на 0,5 мм за счет создания технологического эксцентриситета при шлифовании профиля, с постепенным переходом к основному диаметру $D_{p1-p2}^{K_{1-2}}$. При этом основной диаметр первых роликов $D_{p1-p2}^{K_{1-2}}$ также выполняется с общим занижением относительно диаметра калибрующих профилирующих роликов $D_{p3-p7}^{K_j}$ - с 3-го по 7-й ролик комплекта. Относительное расположение комплекта роликов частично приведена на рисунке 4а, на котором указаны и направления создания эксцентриситета осей первого и второго роликов.

Наиболее нагруженная зона на вершине профиля ролика - поверхности D_i и K_i на рис. 4в с индексами «н1» и «н2», означающих принадлежность к разным сторонам профиля, подвергается многослойному напылению с высокой твердостью поверхности. Внутренняя структура материала за счет термообработки приобретает более жесткий порядок организации, и придает несколько меньшую подповерхностную твердость в зонах, чем твердость наружных поверхностей формообразующих зон профиля ролика.

Очевидно, что такие разные требования к разным зонам профиля диктуются теми требованиями зон деталей в эксплуатации, которые необходимы для равномерного износа и прочности элементов. В данном случае это относится к рабочим поверхностям профилеобразующих накатных роликов, т. е. – инструментальному обеспечению технологической системы.

Формализация такой причинно-следственной связи может быть обеспечена на основе разработанной ранее системы установления формальных связей функционально-ориентированных признаков деталей, и функционально-ориентированных технологических воздействий, формирующих свойства этих деталей [1, 2, 5, 6].

Иллюстрировать схему приведения ФОС детали и качественных аспектов инструмента при обеспечении технологического обеспечения профилирования труб методом накатки можно с помощью рис. 5.

На рис. 5, а приведены обозначения буквами русского алфавита функционально значимых участков и зон детали, а на рис. 5, б – аналогичными буквами с индексацией букв по принадлежности к инструменту по сторонам профиля.

Буквами А, Б, В и Г обозначены посадочные и свободные поверхности детали, мы их опустим из рассмотрения в данной работе. Буквами от Д до К обозначены функциональные зоны и поверхности участков, взаимодействующих в контактной зоне при накатывании профиля детали. Сущность постановки эксплуатационных ФОС детали по локации в системе координат детали технологическим показателям технологического обеспечения, формирующим эти свойства, в частности – поверхностям инструментов, заключается в способности достижения требуемых показателей детали.

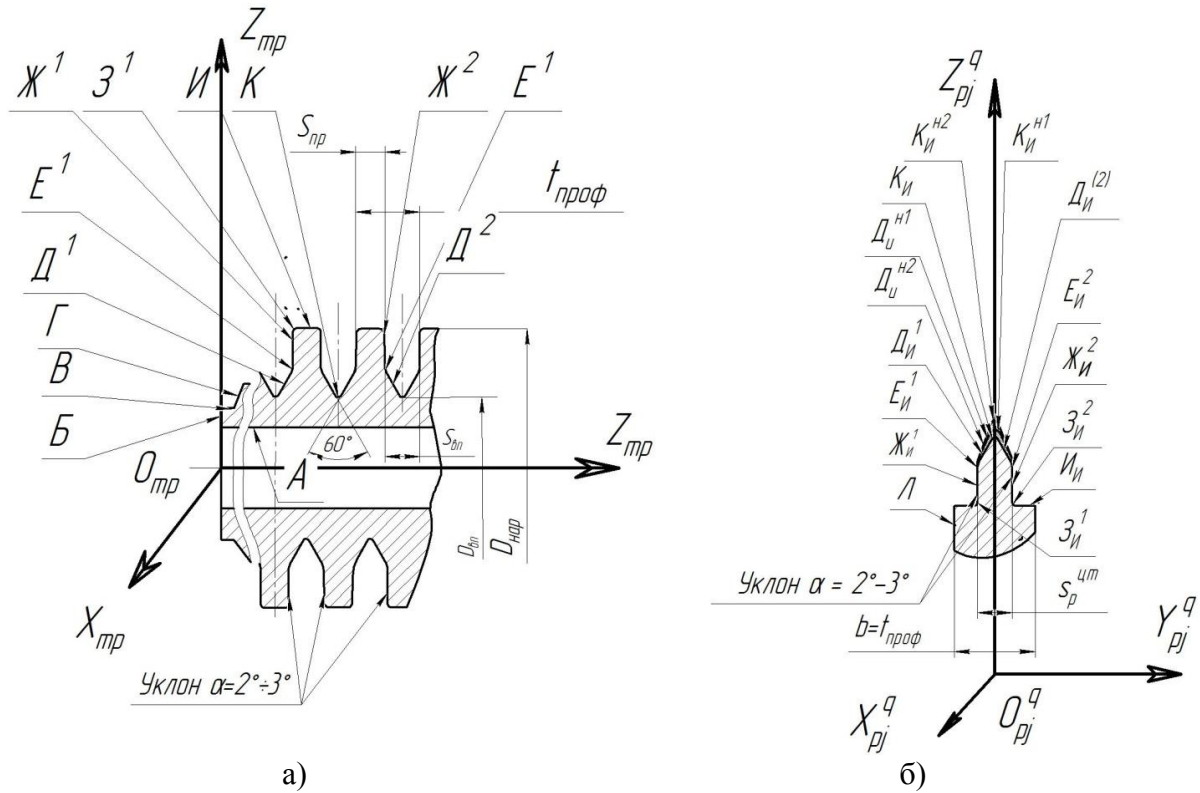


Рисунок 5. Порядок взаимосвязи поверхностей профиля детали и инструмента

Функциональные участки и зоны детали следует обозначить в виде:

$$3_j^{F_{xyz}^{yч}} = 3_{1-b} \Gamma_{xyz}^{(A...C)} \cap 3_{1-n} \Pi_{xyz}^{(A...D)} \cap 3_{1-m} M_{xyz}^{(C...Ж)} \quad (1)$$

где в левой части приведено общее обозначение рассматриваемой зоны детали, а в правой части приведено выражение конъюнкции обозначений свойств геометрии «Г», т.е. формы, свойств поверхности «П» и свойств материала «М» отдельно для каждого участка или функционально значимой зоны детали. Символами 3_j при этом обозначены номера зон и участков детали с указанием координат каждого участка в общей системе координат детали. Специфические ограниченные зоны со специальными требованиями отражаются верхней частью записи в выражении (1), и относятся к геометрии «Г», поверхности «П», или к свойствам материала «М» в заданной зоне, и локализация границ этих участков отражается в частных системах координат элементов детали.

Для участков и зон профилирующих роликов соответствующие поверхности контакта в зоне взаимодействия записываются в аналогичном виде с соответствующей индексацией участков, зон и поверхностей по формируемым свойствам. Локализация участков и зон отражается в декартовой системе координат накатного ролика.

$$3_{g_{xyz}}^p = 3_{j(1,2,...,m)}^{\Gamma(A,B,...,\Phi)} \cap (\cup) 3_{j(1,2,...,n)}^{\Pi(A,B,...,\Phi)} \cap (\cup) 3_{j(1,2,...,q)}^{M(A,B,...,\Phi)} \quad (2)$$

где в левой части выражения (2) представлена общая запись зон накатного ролика, а в правой части конъюнкция или дизъюнкция зон формообразования геометрии или свойств поверхности и структуры подповерхностного слоя материала в зонах профилирования.

Переход от ФОС, отраженных выражением (2), к ФОТ-воздействиям в их множестве и выборе лучших вариантов по рекуррентно-итеративной схеме [2, 3, 5, 6], которые формируют ФОС инструмента в заданных локализациях. Такой подход позволяет выстроить цепь перехода от ФОС деталей к схеме технологического обеспечения через комплексное решение не только технологии изготовления деталей на финишной стадии, но и через технологию расчета и изготовления инструмента, в данном случае путем рационального подхода к изготовлению накатных роликов. Схема, которая отражает указанный подход к накате труб, иллюстрируется следующим выражением:

$$Z_{L_{xyz}}^{F_{xyz}^{yч}} \Rightarrow Z_{j(1,2,\dots,m)}^{G^{(A,B,\dots,\Phi)}_{xyz}} \cap (\cup) Z_{j(1,2,\dots,n)}^{П^{(A,B,\dots,\Phi)}_{xyz}} \cap (\cup) Z_{j(1,2,\dots,q)}^{M^{(A,B,\dots,\Phi)}_{xyz}} \Rightarrow T_{3_j}^{F_{xyz}^{\Phi \cap П \cap M}},$$

где сохранена индексация символов согласно выражениям (1) и (2). При этом последний член выражения отражает ФОТ-воздействие на обрабатываемый элемент согласно ранее разработанной методике [1, 2, 3]. При условии обозначения каждого ФОТ-воздействия в соответствии с разработанной ранее схемой формализации [1, 2, 3] появляется возможность однозначно выявлять лучший вариант технологического обеспечения для рассматриваемого процесса. При этом на каждом этапе лучший вариант определяется на основе рекуррентно-итеративного выбора из установленного множества ФОТ-воздействий для обеспечения технически возможного достижения требуемых качественных показателей обрабатываемой детали.

Заключение

В настоящей работе приведены результаты исследований, касающиеся задачи формообразования, формирования свойств поверхности и свойств поверхностного и подповерхностного слоя материала в процессе изготовления оребренных труб методом ХОППД, в результате чего без образования отходов получают готовую деталь.

В процессе исследований решены следующие частные технические задачи:

1. Установлены функционально-значимые эксплуатационные признаки элементов и участков поверхностей оребренной трубы маслоохладителя и особенности формирования геометрии и свойств элементов, с локализацией в системе декартовых координат детали.

2. Определена и формализована связь атрибутов и конструктивных качественных показателей готовой детали, отражающих эксплуатационные физико-механические и иные свойства элементов и поверхностей трубы, с элементами технологического обеспечения их достижения.

3. Установлена и формализована связь свойств элементов и поверхностей детали с технологическими аспектами инструментального обеспечения процесса накатки и свойствами технологической системы, включая кинематические цепи системы образования требуемой геометрии и поверхностных свойств. Предложена схема записи цепи взаимосвязи, включающие конструктивные функциональные ФОС и признаки

детали, с элементами технологического обеспечения и ФОТ-воздействий при изготовлении специальных инструментов, с помощью которых формируются профили труб маслоохладителей методом ХОППД.

4. Разработан вид и порядок формализованной записи взаимосвязей конструктивных ФОС и признаков, частей, участков и зон деталей, с указанием локализации в общей системе координат детали, с технологическими аспектами ФОТ-систем для реализации необходимых ФОТ-воздействий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Анализ деталей по функциональным признакам участков и зон согласно уровню и глубине технологического обеспечения целевой функции / Котляров В. Б., Котляров С. Б., Михайлов А. Н. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 1 (76). – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

2. Михайлов, А. Н. Синтез структурных схем функционально-ориентированного технологического воздействия при формообразовании и формировании поверхностных свойств деталей КПП / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 2 (73). – С. 53-67. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

3. Михайлов, А. Н. Обеспечение свойств и структуры материала детали с помощью функционально-ориентированного технологического воздействия / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Вып. № 3(74). – С. 38-49. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

4. Аронсон, К. Э. Теплообменники энергетических установок: учебное электронное издание / К. Э. Аронсон, С. Н. Блинков, В. И. Брезгин и др.: под ред. Н. В. Лутова. – Екатеринбург: УрФУ, 2015.

5. Михайлов, А. Н. К вопросу синтеза функционально-ориентированных структурных схем формообразования с использованием линейчатого контакта инструмента и заготовки / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Вып. № 4(75) – С. 38-58. – ISSN 2073-3216, (E)ISSN2518-7120

6. Михайлов, А. Н. Разработка структурной схемы процесса накатки профилей оребренных труб для маслоохладителей тепловозов / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б., Котляров Б. С. // Механики XXI века. – 2022. – № 21. – С. 118–127.

Поступила в редколлегию 14.03.2022 г.

УДК 621.789

Е. В. Овчинников, д-р техн., проф.

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

Тел./Факс: +375 (152) 684108; E-mail: ovchin@grsu.by

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГИБРИДНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ

В статье представлены результаты исследований морфологии нанокomпозиционных покрытий, полученных по аддитивным технологиям путем совмещения методов электроискрового легирования и физического осаждения в вакууме (PVD). Показано, что морфология покрытий зависит от технологических методов формирования покрытий, что оказывает существенное влияние на прочностные, триботехнические свойства. При сочетании данных технологий получения гибридного покрытия возможно формирование MAX-фаз и нанофаз в структуре электроискрового подслоя, а также образование наноструктур в получаемом алмазоподобном слое. Формирование АПП покрытий приводит к уменьшению количества дефектов в подслое, сформированном методом электроискрового легирования. Применение данного технологического подхода приводит к улучшению физико-механических характеристики модифицируемых стальных субстратов. Предполагается, что формирование на поверхности стальных субстратов гибридного покрытия должно приводить к оптимальным триботехническим характеристиками в различных трибологических системах.

Ключевые слова: вакуум, электроискровое легирование, покрытия, морфология, топография.

Y. Auchynnikaŭ**MORPHOLOGICAL FEATURES OF HYBRID MULTILAYER COATINGS FORMED ON CARBON STEEL**

The article presents the results of studies of the morphology of nanocomposite coatings obtained by additive technologies by combining the methods of electrospark alloying and physical deposition in vacuum (PVD). It is shown that the morphology of the coatings depends on the technological methods of coating formation, which has a significant effect on the strength and tribological properties. With the combination of these technologies for obtaining a hybrid coating, the formation of MAX phases and nanophases in the structure of the electrospark sublayer, as well as the formation of nanostructures in the resulting diamond-like layer, is possible. The formation of DLC coatings leads to a decrease in the number of defects in the sublayer formed by the method of electrospark alloying. The application of this technological approach leads to an improvement in the physical and mechanical characteristics of the modified steel substrates. It is assumed that the formation of a hybrid coating on the surface of steel substrates should lead to optimal tribological characteristics in various tribological systems.

Keywords: vacuum, electrospark doping, coatings, morphology, topography.

Введение.

Наиболее распространённым вакуумными покрытиями являются TiN и соединения карбидов и карбонитридов титана. В настоящее время, тонкие слои TiN толщиной 5 мкм применяются в подшипниках и в широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров. Данные покрытия применяются для модифицирования таких изделий как: сверла, редуктора, направляющие для станков различного функционального назначения, штампы, литьевые формы, хонинговальные инструменты, инструмент для обработки металлов и дерева, мелющих тел для мельниц и т.п. Нанося покрытия на данный инструмент, можно улучшить их эксплуатационный ресурс до трех раз, в ряде случаев десятикратно.

Формирование покрытий на режущих кромках обрабатываемого инструмента позволяет повысить качество поверхности и скорость обработки изделий. Тонкий, устойчивый к истиранию слой, имеющий золотой цвет, используются для обеспечения

устойчивости к царапинам в медицинских и декоративных изделиях, таких как ланцеты, скальпели, протезы и металлические корпуса для часов. Значение характерной температуры для формирования покрытий на поверхности твердой подложки находится в области $400^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$. Обычно при такой температуре формируются покрытия, предназначенные для трибологических приложений, но тонкие вакуумные слои для декоративных целей могут осаждаться при более низких температурах, находящихся в пределах $150^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$ [1].

Хотя покрытия на основе TiN имеют самый широкий спектр применения в качестве тонких износостойких слоев, в последнее время они применяются в ограниченном масштабе. Это обусловлено интенсификацией исследований и разработки новых составов и технологий формирования покрытий на основе карбида титана, карбонитрида титана, нитрида титана-алюминия и гафния, хрома, карбида или нитрида циркония [2]. Данные покрытия получают вакуумным напылением, основным представителем которого является PVD. Это обусловлено технологической простотой формирования покрытия, а также тем, что PVD является одним из первых методов получения вакуумных покрытий.

Однако на данный метод существует ряд ограничений, одним из основных является формирование поверхностного слоя, содержащего радиационные дефекты и приводящие поверхность подложки к ионизации, что отрицательно сказывается на адгезионных характеристиках покрытий, скорости роста и формируемой структуры. Для уменьшения данного эффекта в ряде случаев применяют напыление промежуточных материалов, позволяющих нивелировать данный эффект, но это приводит к усложнению технологического цикла и в ряде случаев не приводит к значимому увеличению физико-механических характеристик покрытий.

Вакуумное испарение обычно может выполняться при высоком вакууме (10^{-2} Па – 10^{-5} МПа), в котором длина свободного пробега атома газа (т. е. средний пробег атомом до попадания в другие атомы) соизмеримо с размерами вакуумной камеры. Поскольку это длина свободного пробега атома намного больше размеров вакуумной камеры, то испарившийся атом проходит прямой путь до подложки и формирует покрытие. Для увеличения площади нанесения покрытия необходимо физическое перемещение испаряемого катода или пространственное перемещение подложки, что и реализуется в большинстве конструкций вакуумных камер.

При испарении как металлов, так и неметаллов формируется газовый пар, содержащий большое количество одиночных или сгруппированных атомов. В ряде случаев данные атомы сильно ионизированы. За исключением случая ионизации, энергия частиц очень мала и недостаточно велика для испарения (около $0,1 - 1$ эВ). В процессе формирования покрытия, подложка может не только разогреваться, но и охлаждаться. Среди вакуумных процессов формирования покрытий метод PVD имеет самую высокую скорость вакуумного испарения 75 мкм мин^{-1} ; однако наиболее оптимальная скорость формирования покрытия находится в области до 2 мкм мин^{-1} . Для увеличения адгезионных свойств покрытий возможно формирование промежуточных слоев материалов, обладающих наибольшей адгезионной прочностью к модифицируемому субстрату. Однако адгезия существенно зависит от чистоты субстрата, что достигается путем ионной бомбардировки поверхности подложки. Но применение данной технологии может приводить к уменьшению значений адгезионной составляющей покрытий к подложке [1-2].

Покрытия TiN в большинстве случаев применяются в качестве тонких износостойких слоев. Однако в настоящее время наметилась тенденция замены данного по-

крытия на рынке тонкослойных покрытий на составы с другими материалами, такими как карбид титана, карбонитрид титана, нитрид титана-алюминия и гафний, хром или карбид или нитрид циркония. Это обусловлено также тем, что при температуре выше 500°C нитрид титана переходит в оксид титана, имеющий низкие адгезионные характеристики к металлическим подложкам, а также высокие значения внутренних напряжений, приводящих к растрескиванию покрытий.

Проводимые исследования по определению оптимальных составов вакуумных покрытий показывают преимущество использования многослойных покрытий, которые позволяют существенно улучшить эксплуатационные характеристики модифицируемых поверхностей твердых тел. В оптико-электронной сфере производственной деятельности методы PVD позволяют изготавливать устойчивые к царапинам и огнестойкие покрытия из металлических испаряемых компонентов и их комбинаций. Также существует подходящий рынок сбыта для тонких (<0,1 мкм), прозрачных покрытий, проводящих слоев In – Sn, которые наносятся в качестве антиобледенительных слоев на стекла автомобилей и при строительстве зданий, включающих в свою конструкцию большую долю стеклянных панелей. Сегодня упор при производстве изделий с покрытием делается на тонкие слои с высокими триботехническими свойствами, которые получают из металлов и, реже, из их сплавов. Кроме того, для защиты от коррозии применяются покрытия из Al и Cd. Еще одно применение вакуумных покрытий – это формирование контактных покрытий на концах алюминиевых и медных проводников в ряде электронных устройств.

Однако цель и область применения этих методик PVD заключается в нанесении тонких вакуумных слоев материала, в том числе металлов, сплавов и их комбинаций, осаждение которых невозможно осуществить электроосаждением. В настоящее время ряд методов PVD составляют друг другу конкуренцию, особенно это касается случаев, когда принимается решение по выбору метода подачи реакционного газа в вакуумную камеру. В 20 веке применение данных технологий вакуумного нанесения приводило к различным свойствам формируемых покрытий, несмотря на нанесение одинаковых исходных материалов. В настоящее время составы различными методами PVD, фактически нивелировано благодаря лучшему различию характеристик вакуумных покрытий, получаемых из материалов одинакового контроля и автоматизации процесса. Исходя из выше изложенного, можно утверждать, что применение тех или иных вакуумных покрытий обусловлено не лучшими техническими характеристиками, а в большей части определяются коммерческими аспектами.

Целью исследований являлось морфологии и свойств многофункциональных покрытий на основе металлических и углеродных матриц, получаемых путем сочетания магнитоуправляемых потоков многокомпонентной реакционной среды и плазменного нанесения.

Методика эксперимента.

Композиционные многослойные покрытия на базе алмазоподобных соединений, нитридов, карбидов титана, кобальта, вольфрама наносили методами реактивного электродугового испарения, электроискрового легирования на установках УРМЗ 279.048 и UR-121. В качестве подложек использовал различные марки стали Р6М5 и 4Х5МФС. Поверхность подложек из стали подвергали закалке до HRC 53 – 60 и шлифовке до чистоты не ниже 10 класса.

В качестве объекта исследований использовали алмазоподобное покрытие (АПП) толщиной от 0,48 мкм до 2 мкм, полученное на серийной установке вакуумного напыления УВНИПА-1-001, состоящей из ионного источника, источника плазмы ста-

ционарного катодно-дугового разряда с металлическим катодом, источника плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита. Формирование покрытий проводили при следующих условиях: емкость основной батареи конденсаторов – 2150 мкФ, частота генерации импульсов – 2 Гц, число импульсов – 17000.

Проводилась предварительная обработка стальных субстратов методом электроискрового легирования. В качестве электродов использовали сплавы ВК6, Т15К5. Формировался сверхтвердый подслои на поверхности металлической подложки толщиной порядка 40 мкм. Подслои формировали при различных технологических режимах. Согласно технической документации на прибор UR-121 данные технологические режимы соответствовали параметрам установки Norma 1, Norma 2, Norma 3.

Анализ особенностей структуры металлических покрытий и их модификаций материалов, подвергнутых различным видам обработки, осуществляли на универсальном металлографическом комплексе ЗАО «Спектроскопические системы». Топографию защитных слоев определяли на профилометре «Surftest SJ-210».

Результаты исследований.

Повышение тепловой стойкости металлообрабатывающего инструмента напрямую связано с повышением эксплуатационных характеристик изделий, т.к. в зоне резания на микроучастках возникают области с температурой плавления намного выше температуры плавления исходного материала. Возникающие экстремальные условия соответствуют режимам эксплуатации лопаток турбин авиационного двигателя [3]. Таким образом, подходы, применяемые для увеличения эксплуатационных характеристик конструктивных элементов турбин за счет создания термостойких барьерных покрытий, можно использовать при модифицировании различного типа обрабатывающего инструмента.

Современный подход для создания термобарьерных покрытий заключается в получении керамического верхнего покрытия из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ), металлического связующего покрытия (BC, MCrAlYX, M = Ni / Co, X = Hf, Ta, Re, Si) и подслоя жаропрочного сплава на основе Ni. В настоящее время данный тип покрытий обычно производят либо путем электронно-лучевого физического осаждения из паровой фазы (EB-PVD) или атмосферным плазменным напылением (APS) [4-6].

Однако основным недостатком покрытий YSZ является ограничение температурного рабочего интервала значением 800 С при длительном времени эксплуатации в рабочих условиях. Эксплуатация данного типа покрытий при более высоких температурах, чем вышеуказанная, приводит к перекристаллизации в структуре слоев, полученных вакуумным напылением. Структурные превращения, высокие внутренние напряжения, возникающие при разогреве до выше указанной температуры с последующим резким охлаждением, приводят к образованию трещин в объеме покрытия.

Чтобы уменьшить влияние данных недостатков в ТБП интенсифицировался поиск новых материалов, составов и технологий, в последнем десятилетии. Предлагаются материалы на основе Al_2O_3 , TiO_2 , муллит, $CaO/MgO + ZrO_2$, $CeO_2 + YSZ$, силикаты, алюминат лантана, циркон, композит металл – стекло, гранат ($Y_3AlxFe_5 - xO_{12}$) и фосфат циркония ($(Ca/Mg) Zr_4 (PO_4)_6$) [7].

В настоящее время к износостойким и термостойким вакуумным покрытиям предъявляются следующие основные требования: высокая температура плавления, отсутствие процессов перекристаллизации при нагреве изделия от комнатной температуры до температуры эксплуатации, низкая теплопроводность, химическая инертность, соответствие теплового расширения покрытия металлической подложке, хорошая адге-

зия к металлической подложке, низкая скорость спекания и микропористость в структуре покрытия [8] – [9]. В связи с этим предлагаются барьерные вакуумные покрытия, состоящие из нескольких слоев, формируемых различными технологиями. В частности, предлагается сочетание электроискрового метода нанесения покрытий (ЭИЛ) и метода вакуумного формирования EB-PVD.

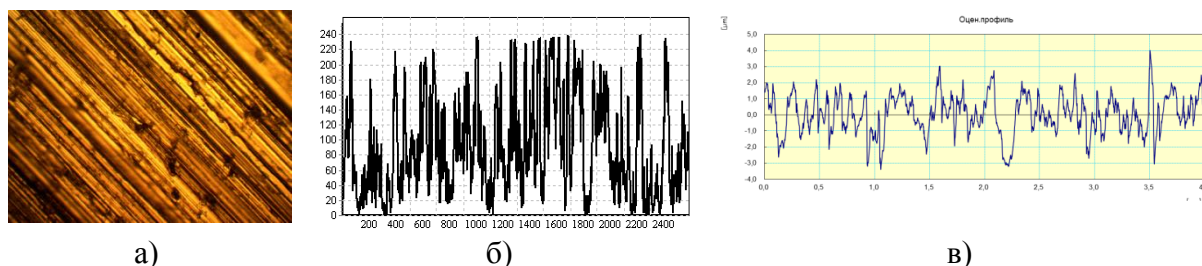


Рисунок 1. Морфология поверхности исходной стали 4X5MFC: а-морфология (x500), б-шероховатость (x500), в-топография.

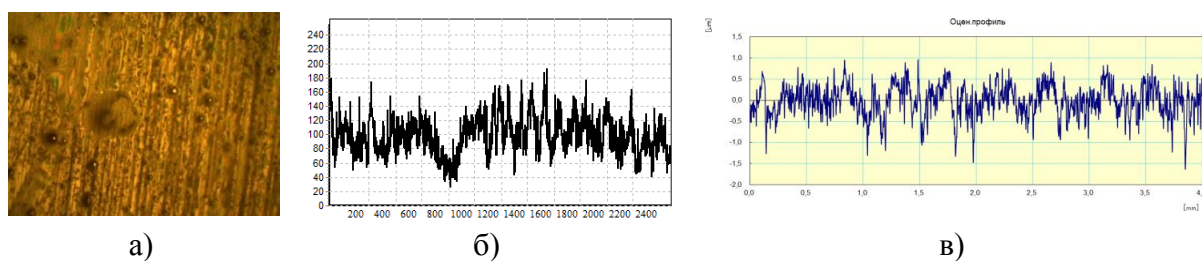


Рисунок 2. Морфология поверхности исходной стали 4X5MFC с покрытием АПТ: а -морфология (x500), б-шероховатость (x500), в-топография.

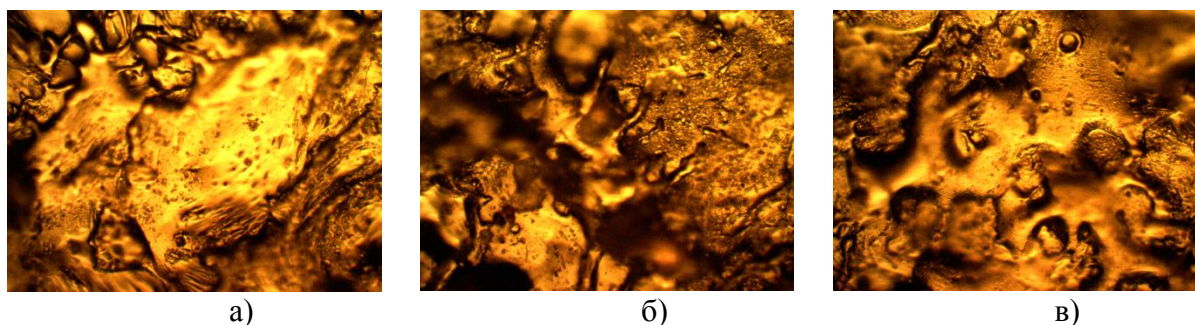
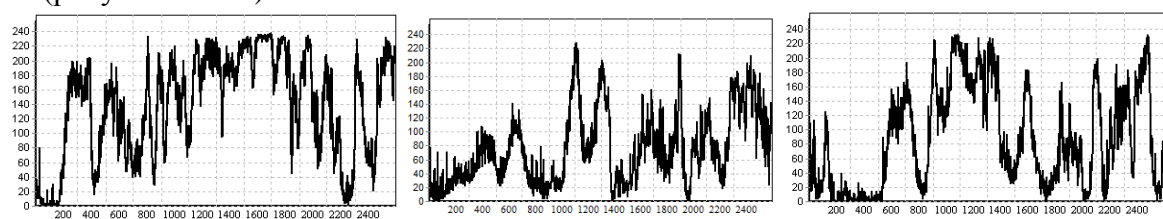


Рисунок 3. Морфология поверхностных слоев сплава Т15К6, сформированного на стали 4X5MFC методом электроискрового легирования: а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; (x500)

Метод электроискрового легирования заключается в явлении электрической эрозии и переноса материала анода на поверхность катода-детали при протекании импульсных (искровых) разрядов в газовой среде (воздухе, аргоне, азоте и др.) [10]. В результате образуется высокотвердый слой на поверхности субстрата с геометрическими размерами по толщине порядка 40 – 60 мкм. Формирование на данном подслое сверхтвердых вакуумных покрытий, например алмазоподобных (DLC) методом EB-PVD, должно приводить к образованию защитных покрытий, превосходящих по своим физико-механическим характеристикам образующих их твердые и сверхтвердые покрытия, т.е. при совмещении данных технологий и используемых материалов должен наблюдаться

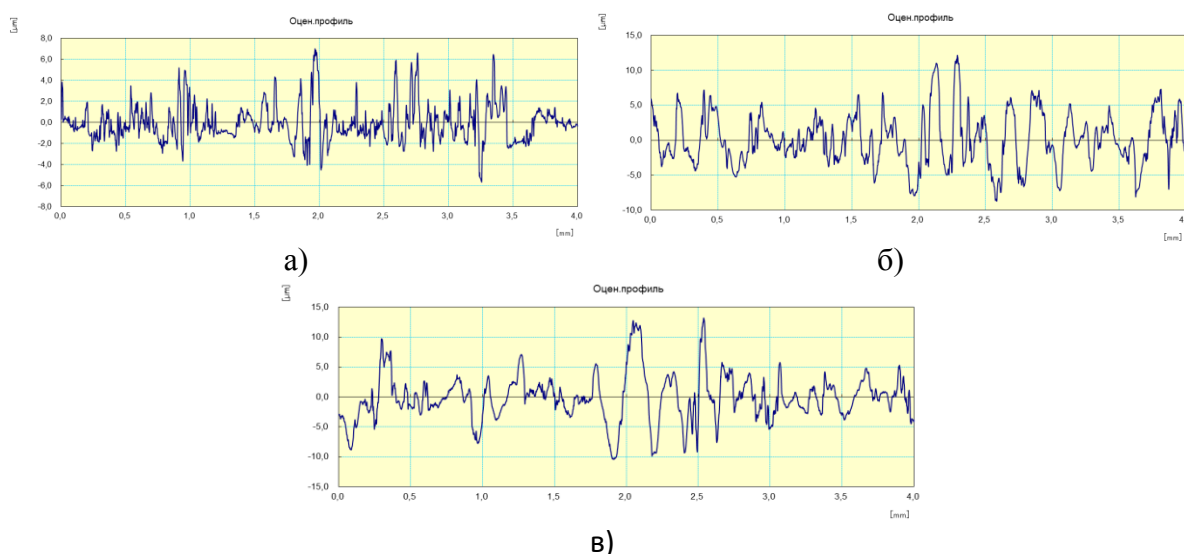
синергический эффект увеличения прочностных, антикоррозионных, антифрикционных, термостойких характеристик. В процессе исследований проведено изучение морфологии поверхностных слоев исследуемых подслоев и многофункциональных покрытий (рисунки 1 – 14).



а, б – режим Norma 1, установка UR-121; в, г – режим Norma 2, UR-121; д, е- режим Norma 3, UR-121 (данные получены с применением программного комплекса AutoScan)

Рисунок 4. Шероховатость поверхностных слоев сплава Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования

Согласно проведенных исследований, формирование алмазоподобных покрытий на стальных подложках 4Х5МФС и Р6М5 приводит к сглаживанию исходного рельефа. Значения шероховатости исходной поверхности стали 4Х5МФС составляют $R_z \sim 5,9$ мкм, после формирования покрытия АПП значения R_z уменьшаются до значений $\sim 2,7$ мкм. Аналогичный процесс наблюдается при формировании покрытия на стали Р6М5. Так, значения R_z для исходного субстрата составляют $R_z \sim 3,9$ мкм, после формирования покрытия $\sim 2,1$ мкм.



а – режим Norma 1, установка UR-121; б – режим Norma 2, установка UR-121; в – режим Norma 3, UR-121

Рисунок 5. Топография поверхностных слоев сплава Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования.

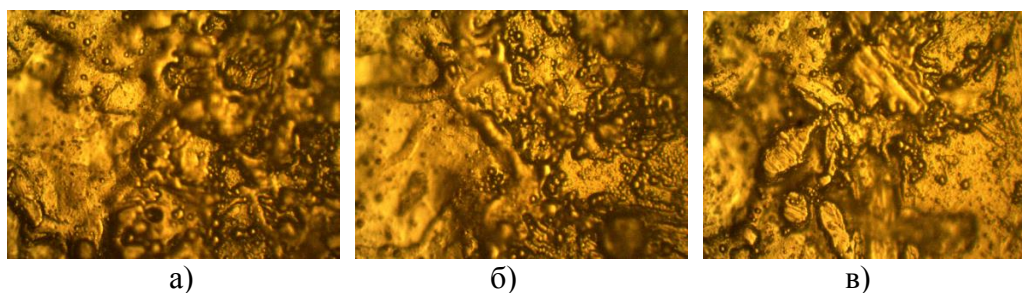


Рисунок 6. Морфология поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования: а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; ($\times 500$)

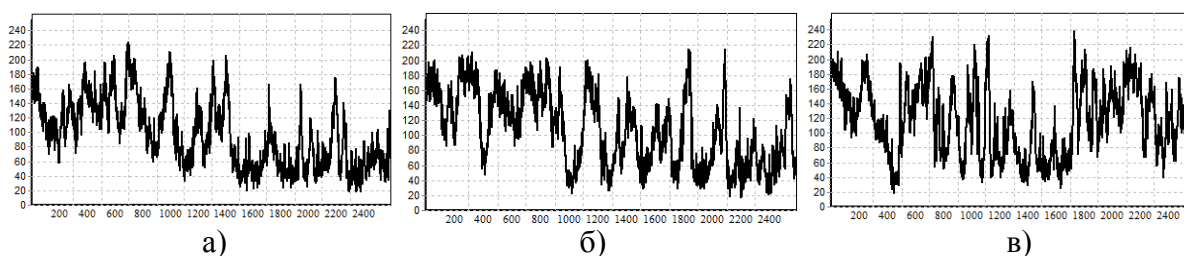


Рисунок 7. Шероховатость поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом ЭИЛ: а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; (данные получены с применением программного комплекса AutoScan) ($\times 500$)

Нанесение подслоя из сверхтвердых сплавов ВК6 и Т15К6 на стальные субстраты 4Х5МФС и Р6М5 приводит к увеличению параметров шероховатости формируемого покрытия. Причем данное изменение параметров топографии увеличивается с возрастанием значений энергии импульса в электрическом разряде при проведении ЭИЛ процесса. Так, значение R_z для покрытий сплава Т15К6, сформированного на стальной подложке 4Х5МФС, для режима Norma 1 установки UR-121 составило $\sim 9,7$ мкм, для режима Norma 2 – $\sim 14,8$ мкм, для режима Norma 3 – $\sim 17,8$ мкм.

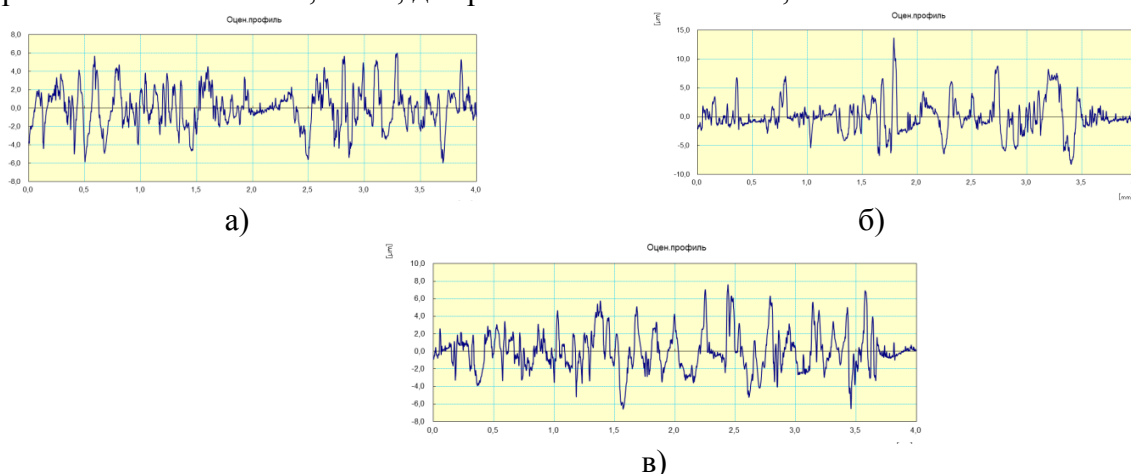


Рисунок 8. Топография поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования а – режим Norma 1, установка UR-121; б – режим Norma 2, UR-121; в – режим Norma 3, UR-121

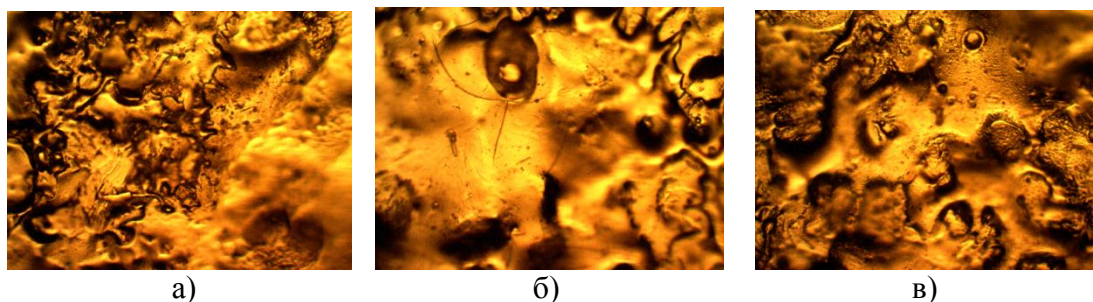
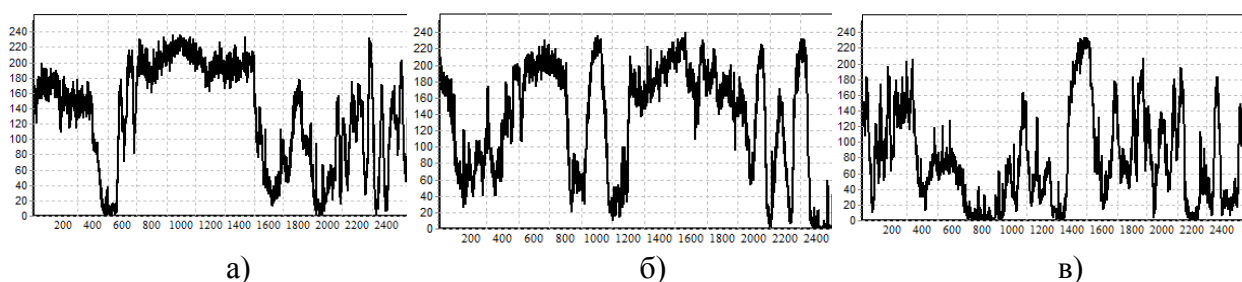
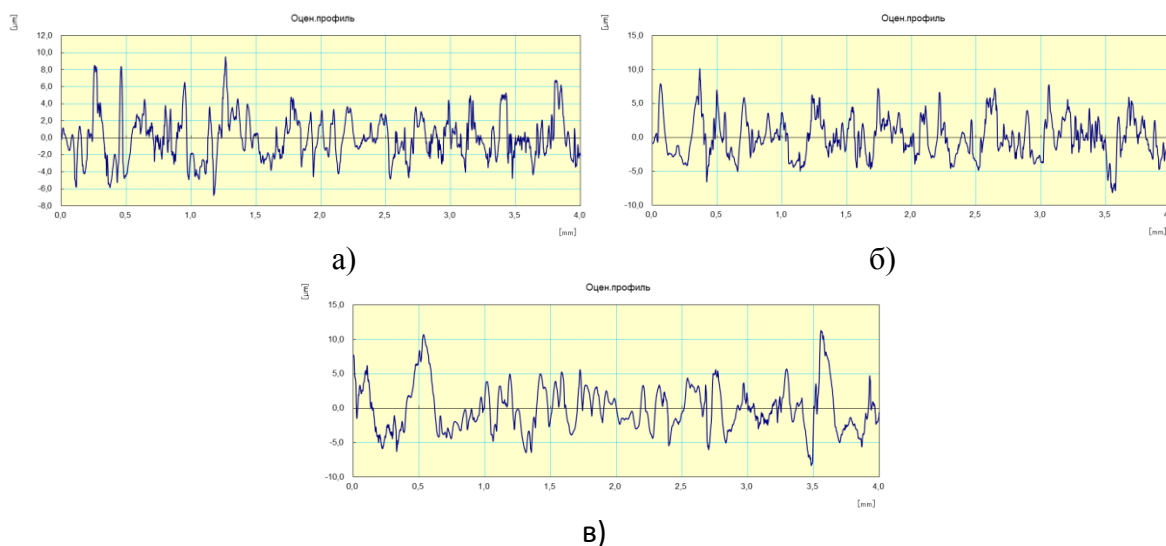


Рисунок 9. Морфология поверхностных слоев сплава ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования: а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; ($\times 500$).



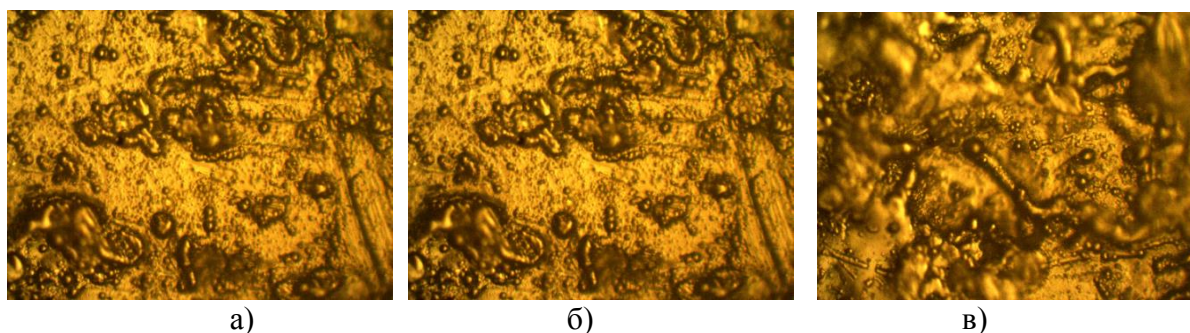
а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; (данные получены с применением программного комплекса AutoScan) ($\times 500$)

Рисунок 10. Шероховатость поверхностных слоев сплава ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования.



а – режим Norma 1, установка UR-121; б – режим Norma 2, UR-121; в – режим Norma 3, UR-121

Рисунок 11. Топография поверхностных слоев сплава ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования.



а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121;
в - режим Norma 3, UR-121; ($\times 500$)

Рисунок 12. Морфология поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования

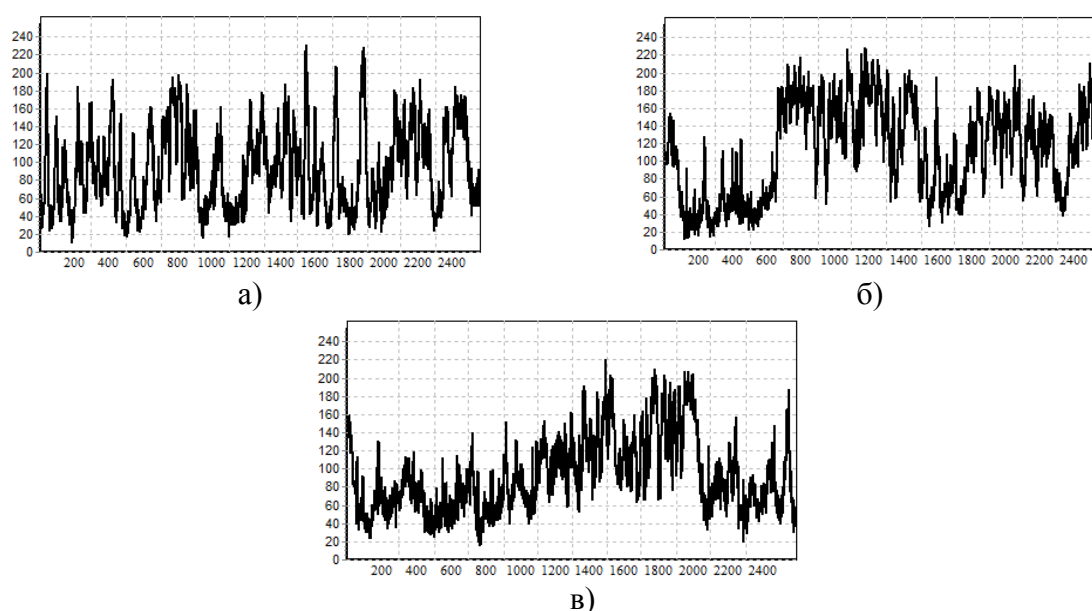


Рисунок 13. Шероховатость поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования: а, б – режим Norma 1, установка UR-121; в, г – режим Norma 2, UR-121; д, е – режим Norma 3, UR-121 (данные получены с применением программного комплекса AutoScan)

Значения R_z для покрытий сплава ВК6, сформированных на стальной подложке 4Х5МФС для режима Norma 1 установки UR-121 составило $\sim 12,3$ мкм, для режима Norma 2 – $\sim 13,3$ мкм, для режима Norma 3 – $\sim 14,2$ мкм. При формировании покрытий Т15К6 на стальных субстратах Р6М5 для режима Norma 1 установки UR-121 R_z составило $\sim 8,1$ мкм, для режима Norma 2 – $\sim 14,3$ мкм, для режима Norma 3 – $\sim 16,8$ мкм. Значения R_z для покрытий сплава ВК6, сформированного на стальной подложке Р6М5, для режима Norma 1 установки UR-121 составило $\sim 11,1$ мкм, для режима Norma 2 – $\sim 12,3$ мкм, для режима Norma 3 – $\sim 14,3$ мкм.

Формирование покрытий АПП на стальных субстратах с покрытиями из сверхтвёрдых материалов, в общем случае приводит к снижению параметров шероховатости

в 1,7 – 2,3 раза. Осаждение алмазоподобного покрытия на стальной субстрат 4Х5МФС, модифицированный электроискровым методом (ЭИЛ) электродами Т15К6 и ВК6, приводит к снижению значений шероховатости для всех режимов формирования многофункционального композиционного покрытия: покрытие ЭИЛ Т15К6 -АПП (режим Norma 1) – $R_z \sim 8,7$ мкм; покрытие ЭИЛ Т15К6 -АПП (режим Norma 2) – $R_z \sim 11,3$ мкм; покрытие ЭИЛ Т15К6 -АПП (режим Norma 3) – $R_z \sim 14,1$ мкм; покрытие ЭИЛ ВК6 -АПП (режим Norma 1) – $R_z \sim 10,7$ мкм; покрытие ЭИЛ Т15К6 -АПП (режим Norma 2) – $R_z \sim 11,9$ мкм; покрытие ЭИЛ Т15К6-АПП (режим Norma 3) – $R_z \sim 13,4$ мкм. Аналогичное явление наблюдается для покрытий АПП, сформированных на стальных субстратах, модифицированных методом ЭИЛ электродами Т15К6 и ВК6.

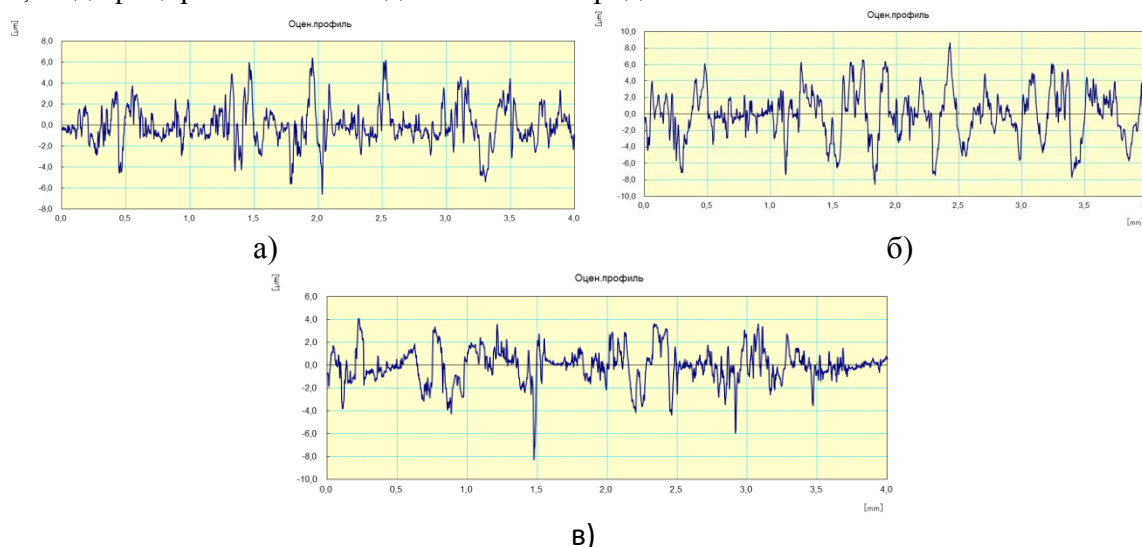


Рисунок 14. Топография поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования: а – режим Norma 1, установка UR-121; б – режим Norma 2, UR-121; в – режим Norma 3, UR-121.

Таким образом формируется многофункциональное покрытие, состоящее из стальной основы повышенной твердости, за счет модифицирования сверхтвердым материалом на основе соединений ВК6 и Т15К6, которое хорошо воспринимает большие внешние нагрузки различного типа: динамические, статические. Слои АПП, получаемые по вакуумным технологиям, плакируют поверхностные дефекты, которые характерны для ЭИЛ покрытий на стальных субстратах, одновременно выполняют роль триботехнического покрытия, имеющего низкий коэффициент трения и высокую износостойкость, что должно приводить к увеличению антифрикционных характеристик многофункциональных композиционных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Olay, J. J., Piratoba U., Rodil S. E. Corrosion Resistance of CrN Coatings Deposited by Physical Vapor Deposition (PVD) with Unbalanced Magnetron Sputtering (UBM): Efficient and Environmentally Clean Technology. // Rev. Latin Am. Metal. Mat. – 2011. – Vol. 31. – P. 44 – 51.
2. Purandare Y. P., Ehasarian A. P., Hovsepien P. E. Deposition of Nanoscale Multi-layer CrN/NbN Physical Vapor Deposition Coatings by High Power Impulse Magnetron Sputtering. // J. Vac. Sci. Technol., A. – 2008. – Vol. 26. – P. 288 – 296.

3. Cremer R. [et al.] Thermal stability of Al-O-N PVD diffusion barriers // Surf. Coat. Technol. – 1998. – Vol. 108 – 109. – P. 48 – 58.
4. Cao X. Q., Vassen R., Stöver D. Ceramic materials for thermal barrier coatings// J. Eur. Ceram. Soc. – 2004. – Vol. 24. – P. 1 – 10.
5. He L. M. Effects of EB-PVD Process TGO Formation and Growth within Thermal Barrier Coatings // Mater. Sci. Forum. – 2007. – Vol. 546 – 549. – P. 1781 – 1788.
6. Saruhan B. EB-PVD processing of pyrochlorestuctured, La₂Zr₂O₇-based TBCs // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 182. – P. 175 – 183.
7. Cao X. Q., Vassen R., Stöver D. Ceramic materials for thermal barrier coatings// J. Eur. Ceram. Soc. – 2004. – Vol. 24. – P. 1 – 10.
8. Vaßen R. [et al.] New materials for advanced thermal barrier coatings // Proceedings of the 6th Liège Conference on Materials for Advanced Power Engineering, Université de Liège, Belgium, November 1998. – 1998. – P. 1627 – 1635.
9. Cemuschi F. [et al.] Thermal diffusivity/microstructure relationship in Y-PSZ thermal barrier coatings// J. Therm. Spray Technol. – 1999. – Vol. 8 (1). – P. 102 – 109.
10. Овчинников, Е. В. Структурные особенности нанокomпозиционных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования / Овчинников Е. В. [и др.] // Горная механика и машиностроение. - 2020. - № 1. - С. 93-100.

Поступила в редакцию 15.03.22г.

УДК 621.838.222

М. П. Шишкарев, д-р техн. наук, доцент

Донской государственной технической университет, РФ

Тел.: +8(908)193-33-93; E-mail: shishkarev_m_p@mail.ru**АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ С РАЗДЕЛЬНЫМ СИЛОВЫМ ЗАМЫКАНИЕМ**

В статье приведены результаты разработки вариантов адаптивной фрикционной муфты второго поколения с раздельным силовым замыканием. Показано, что вращающий момент основной фрикционной группы адаптивной фрикционной муфты второго поколения может принимать максимальное значение внутри интервала изменения коэффициента трения и обращаться в нуль при максимальном значении последнего, а значение коэффициента трения, соответствующее максимальному значению вращающего момента данной фрикционной группы, обратно пропорционально коэффициенту усиления.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, второе поколение, вариант, фрикционная группа, коэффициент усиления, коэффициент трения, раздельное замыкание.

М. P. Shishkarev**ANALYSIS OF ADAPTIVE FRICTION OPTIONS COUPLINGS OF THE SECOND GENERATION WITH SEPARATE POWER CLOSURE**

The article presents the results of the development of variants of the adaptive friction clutch of the second generation with a separate power closure. It is shown that the torque of the main friction group of the adaptive friction clutch of the second generation can take the maximum value within the interval of change of the coefficient of friction and go to zero at the maximum value of the latter, and the value of the coefficient of friction corresponding to the maximum value of the torque of this friction group is inversely proportional to the gain.

Keywords: adaptive friction clutch, second generation, variant, friction group, gain factor, friction coefficient.

1. Введение

Результаты исследования базового варианта адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения выявили ее ограниченные возможности с точки зрения точности срабатывания [1, 2]. Причина ограниченной точности муфты заключается в ограничении, накладываемом на максимальное значение коэффициента усиления (КУ) [3].

Цель исследования. Синтез конструктивных вариантов АФМ второго поколения с измененными схемами силового замыкания пар трения основной фрикционной группы (ОФГ) и дополнительной фрикционной группы (ДФГ).

Задачи исследования. 1. Анализ изменения значений вращающих моментов ОФГ и ДФГ вариантов АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием. 2. Выбор оптимального, по критерию точности срабатывания, варианта АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием. 3. Анализ изменения значений распорных сил, возбуждаемых парами трения ОФГ и парами трения ДФГ в отдельности.

2. Основное содержание и результаты работы

Рассмотрим три различных варианта работы АФМ:

– функция (1) обращается в ноль при любом значении коэффициента трения, принадлежащем интервалу $f_{\min} \dots f_{\max}$, кроме его нижнего и верхнего граничных значений;

$$F_{p1} = (z-1)F_n C_f \frac{1-C_f}{1+(z-1)C_f} \quad (1)$$

– функция (1) обращается в нуль при значении коэффициента трения, равном f_{\max} ;

– функция (1) обращается в нуль при значении коэффициента трения, равном f_{\min} .

В соотношении (1) и подстрочных комментариях приняты следующие обозначения:

ния: F_{p1} – распорная сила, возбуждаемая вращающим моментом пар трения ОФГ; $F_{п}$ – сила натяжения пружины, замыкающей пары трения ОФГ и ДФГ муфты; f_{min}, f_{max} – соответственно минимальный и максимальные коэффициенты трения.

Вариант 1. Обращение в ноль функции (1) означает выключение из работы пар трения ОФГ. Согласно принципу действия исследуемой АФМ, ОФГ охвачена отрицательной обратной связью, и ее выключение из работы означает превращение объекта в неадаптивную муфту [4, 5], в которой обратная связь не действует.

Данная конфигурация муфты отличается низкой точностью срабатывания, и по этой причине рассматриваемый вариант, несмотря на принципиальную возможность его реализации, не может быть рекомендован для использования на практике.

Вариант 2. Данный вариант предполагает выключение из работы пар трения ОФГ при значениях коэффициента трения, таких, что $f_{min} < f_k < f_{max}$ (где f_k – коэффициент трения, соответствующий точке максимума нагрузочной характеристики ОФГ).

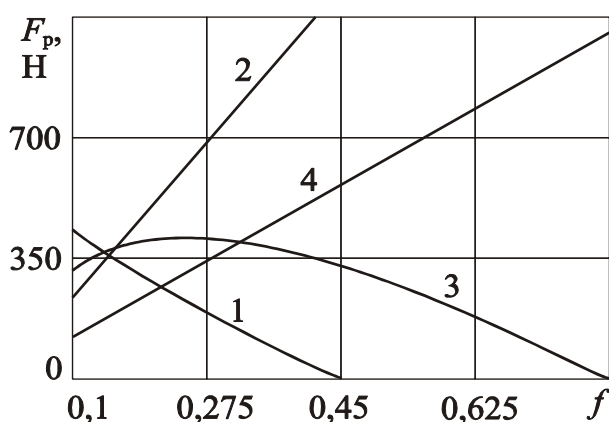


Рисунок 1. Зависимости распорной силы от коэффициента трения

В этом случае в интервале значений коэффициента трения $f_{min} \dots f_k$ муфта будет работать в адаптивном режиме, т. е. с автоматическим регулированием усилия прижатия друг к другу пар трения ОФГ, следовательно, с повышенной точностью срабатывания. В интервале значений $f_k \dots f_{max}$, вследствие выключения из работы пар трения ОФГ, автоматическое регулирование в муфте не действует, в связи с чем муфта становится неадаптивной, поскольку вся нагрузка передается парами трения ДФГ.

В результате этого точность срабатывания будет заметно снижена, что не является

выгодным режимом функционирования АФМ.

Вариант 3. Обращение в нуль функции (1) при значении коэффициента трения, равном f_{max} , означает одновременное с этим выключение из работы обратной связи. Следовательно, в данном варианте автоматическое регулирование в муфте осуществляется в интервале значений $f_{min} \dots f_{max}$, исключая его верхнее граничное значение. Поэтому точность срабатывания АФМ в данном варианте будет наибольшей при значении КУ C , вычисляемом по соотношению:

$$C = \frac{1}{f_{max}} \tag{2}$$

Графики изменения значений распорных сил F_{p1} и F_{p2} , где F_{p2} – распорная сила, возбуждаемая вращающим моментом пар трения ДФГ:

$$F_{p2} = F_{п} C f \tag{3}$$

показаны на рис. 1. Кривые 1 и 3 отражают функцию (1) при различных значениях КУ

С :

– кривая 1 – при $C = 2,5$;

– кривая 2 – при $C = 1,25$.

Прямые 2 и 4 отражают графики функции (3) при значениях КУ C , соответствующих кривой 1 и кривой 3.

Остальные исходные данные, принятые при построении графиков: $z = 6$, $F_n = 1000$ Н. Интервал изменения значения коэффициента трения указан на оси абсцисс рис. 1.

Прямая 2 показана на рис. 1 в ограниченном интервале значений коэффициента трения $f = 0,1 \dots 0,38$. Это объясняется следующим: при $f = 0,38$ распорная сила F_{p2} становится равной силе натяжения пружины $F_n = 1000$ Н, после чего сила F_{p2} увеличивается нелинейно. Данный участок интервала изменения значения коэффициента трения, ввиду резкого увеличения вращающего момента и снижения точности срабатывания, интереса не представляет.

Графики (прямые 2 и 4) показывают, что при увеличенном значении КУ C распорная сила F_{p2} увеличивается быстрее, чем при предельно допустимом значении КУ, вычисленном по соотношению (2). В результате этого равенство $F_{p2} = F_n$ в первом случае (прямая 2) наступает при меньшем значении коэффициента трения, чем во втором случае (прямая 4).

Из изложенного следует, что увеличение КУ C приводит к росту полной распорной силы и к уменьшению ширины интервала изменения коэффициента трения, внутри которого на пары трения ОФГ действует отрицательная обратная связь.

Поскольку с увеличением ширины упомянутого интервала изменения коэффициента трения повышается точность срабатывания АФМ [6, 7], можно сделать вывод о том, что распорная сила F_{p2} , возрастающая гораздо быстрее, чем распорная сила F_{p1} (см. парные графики 1 и 2, 3 и 4), доминирует в формировании полной распорной силы в муфте.

Действие вращающего момента T_2 ДФГ для повышения значения КУ C , обеспечивающей функционирование обратной связи в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$, необходимо уменьшать.

Обратимся с этой целью к соотношению, отражающему нагрузочную способность ДФГ и имеющему вид:

$$T_2 = F_n R_{cp} f . \quad (4)$$

Изменять, в частности, уменьшать значение вращающего момента T_2 можно посредством варьирования величин двух параметров – средний радиус поверхностей трения пар ОФГ и ДФГ R_{cp} и F_n .

Вариант АФМ, в которой исследовано влияние параметра R_{cp} на точность срабатывания, рассмотрен в работах [8, 9]. Результаты исследования показали, что наибольшая точность срабатывания муфты достигается при отношении среднего радиуса поверхностей трения ДФГ к среднему радиусу поверхностей трения ОФГ, равном 0,85. Вместе с тем, в упомянутой работе отмечается, что повышение точности срабатывания АФМ относительно невелико, и в ряде случаев не соответствует требованиям,

предъявляемым к предохранительным муфтам по надежной защите приводов машин от перегрузок [10].

Положим в формуле (4) вместо параметра F_n параметр nF_n (где n – коэффициент, $n \neq 1$). Тогда формулу (4) запишем в следующем виде:

$$T_2 = nF_n R_{cp} f . \quad (5)$$

Коэффициент n в формуле (5) означает, что значение усилия замыкания пары трения ДФГ должно отличаться от значения усилия замыкания пар трения ОФГ.

Исследуем влияние введенной корректировки на распорные силы F_{p1} и F_{p2} . Учитывая, что по-прежнему распорные силы F'_{p1} и F'_{p2} формируются за счет соответственно момента сил трения ведомых пар ОФГ и момента сил трения пары ДФГ, используя полученные выше результаты, запишем:

$$F'_p = (z-1)(F_n - F'_p)Cf + nF_n Cf , \quad (6)$$

где F'_p – полная (общая) распорная сила, действующая в муфте.

Решение уравнения (6) имеет следующий вид:

$$F'_p = F_n Cf \frac{z-1+n}{1+(z-1)Cf} . \quad (7)$$

Сравнение соотношения

$$F_p = zF_n R_{cp} f \frac{1}{1+(z-1)Cf} \quad (8)$$

и (7) показывает, что при одном и том же значении КУ C и при $n < 1$ (как это следует из изложенного выше) выполняется неравенство $F'_p < F_p$. Это означает, что в данном случае точность срабатывания муфты при уменьшенном значении силового замыкания пары трения ДФГ снижается.

В соотношении (8) параметр F_p означает полную распорную силу в АФМ.

Значение распорной силы F_{p1} при дифференцированном силовом замыкании пар трения ОФГ и ДФГ, очевидно, не изменяется (при сохранении параметров, относящихся к ОФГ) и по-прежнему может быть вычислено по формуле (1). Значение распорной силы F'_{p2} для рассматриваемого случая вычисляется по следующей формуле

$$F'_{p2} = nF_n Cf . \quad (9)$$

Очевидно, что неравенство $F'_p < F_p$, приведенное выше, обусловлено именно тем, что, согласно изложенному, а также условию, наложенному на ограничение величины коэффициента n , выполняется условие $F'_{p2} < F_{p2}$.

Таким образом, предлагаемый вариант АФМ предполагает, что силовое замыкание пар трения ОФГ осуществляется силой, равной F_n , а пары трения ДФГ – силой, равной nF_n .

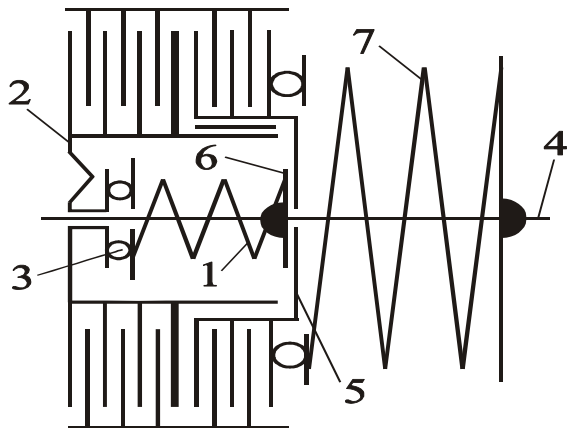


Рисунок 2. Принципиальная схема № 1 силового замыкания АФМ

Очевидно, что конструктивный вариант предлагаемой АФМ должен включать две пружины, расположенные по следующим возможным схемам:

- отдельное, не зависимое от пары трения ДФГ, силовое замыкание пар трения ОФГ;
- отдельное, не зависимое от пар трения ОФГ, силовое замыкание пары трения ДФГ;
- общее силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ с помощью одной пружины, дополнительное силовое замыкание пар трения ОФГ с помощью второй пружины;
- силовое замыкание пар трения ОФГ, не зависимое от силового замыкания пары трения ДФГ;
- силовое замыкание пары трения ДФГ, зависимое от силового замыкания пар трения ОФГ.

трения ОФГ.

Принципиальные конструктивные схемы предложенных вариантов силового замыкания пар трения ОФГ и ДФГ показаны на рис. 2–5.

Схема, изображенная на рис. 2, соответствует первому варианту силового замыкания. Для осуществления раздельного, не зависимого одно от другого, силового замыкания пружина 1 левым торцом опирается на нажимной диск 2 через упорный подшипник 3, правым торцом – на жесткий упор, закрепленный на ступице полумуфты 4. Таким образом осуществляется обособленное силовое замыкание пар трения ОФГ.

Для осуществления обособленного силового замыкания пар трения ДФГ последние конструктивно выделены в отдельный узел, который состоит из стакана 5, кинематически связанного со ступицей нажимного диска в окружном направлении, на фланец которого опирается пакет дисков ДФГ. Стакан, в свою очередь, опирается на жесткий упор 6, так что осевое усилие, воспринимаемое стаканом от пружины 7, на нажимной диск не передается. Таким образом, осуществляется обособленное силовое замыкание пар трения ДФГ.

На рис. 3 изображен первый вариант второй схемы силового замыкания. Пружина 1 осуществляет общее силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ. Пружина 2, расположенная между нажимным диском 3 и жестким упором 4, который закреплен на ступице полумуфты 5, осуществляет дополнительное силовое замыкание только пар трения ОФГ. Благодаря этому реализуется раздельное силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ.

Второй вариант второй схемы силового замыкания показан на рис. 4. Схема отличается конструктивной простотой и включает пружину 1, которая, как и в схеме № 1, обеспечивает общее силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ. Особенностью схемы является то, что левый торец

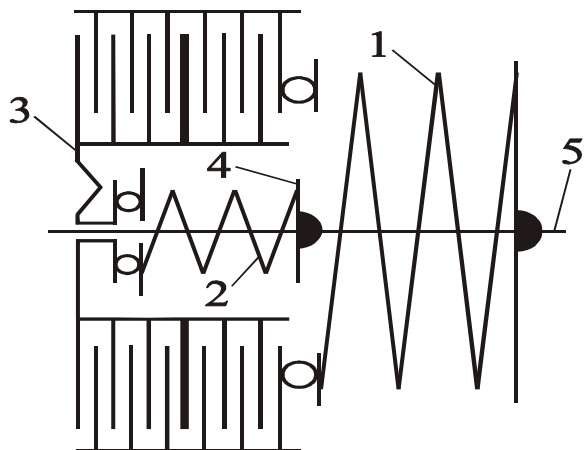


Рисунок 3. Первый вариант принципиальной схемы № 2 силового замыкания

пружины 2, осуществляющей силовое замыкание пар трения ОФГ, упирается в нажимной диск 3, а правый торец – во фланец 4, свободно посаженный на ступицу полумуфты 5.

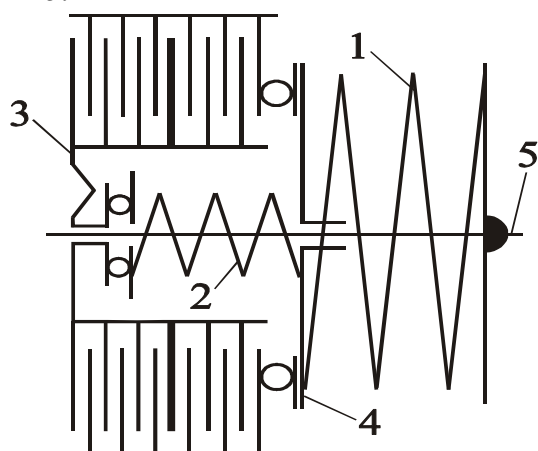


Рисунок 4. Второй вариант принципиальной схемы № 2 силового замыкания

диски трения) посажены на стакан между его упорным диском и фланцем 3.

Некоторое разнообразие приведенных выше схем силового замыкания, очевидно, предполагает различие в математических зависимостях, с помощью которых описываются соответствующие варианты АФМ.

Обсуждение и результаты. Возможность обращения в нуль вращающего момента ОФГ при максимальном значении коэффициента трения и более быстрое увеличение распорной силы от вращающего момента пар трения ДФГ создает предпосылки для ограничения максимального значения КУ.

Результаты исследования, могут быть использованы при синтезе АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием пар трения ОФГ и ДФГ.

3. Заключение

1. Дифференцированный анализ изменения значений вращающих моментов фрикционных групп показал, что вращающий момент ОФГ может принимать максимальное значение внутри интервала изменения коэффициента трения и обращаться в нуль при его максимальном значении.

2. Значение коэффициента трения, соответствующее максимальному значению вращающего момента ОФГ, обратно пропорционально коэффициенту усиления.

3. С точки зрения точности срабатывания АФМ предпочтительным является вариант, отмеченный в п. 1.

4. Дифференцированный анализ изменения значений распорных сил, возбужда-

Третья схема силового замыкания показана на рис. 5. Данная схема реализуется за счет того, что пары трения ОФГ замыкаются при помощи пружины 1, левый торец которой упирается в нажимной диск 2. Правый торец пружины 1 передает усилие фланцу 3, центрированному по ступице 4 полумуфты и имеющему возможность осевого перемещения. Усилие передается через опорную шайбу 5 и пальцы 6, пропущенные сквозь отверстия стакана 7, который смонтирован на ступице нажимного диска. Слева стакан опирается на жесткий упор 8, закрепленный на ступице полумуфты.

Силовое замыкание пар трения ДФГ осуществляется при помощи пружины 9 через фланец 3. Пары трения ДФГ (внутренние

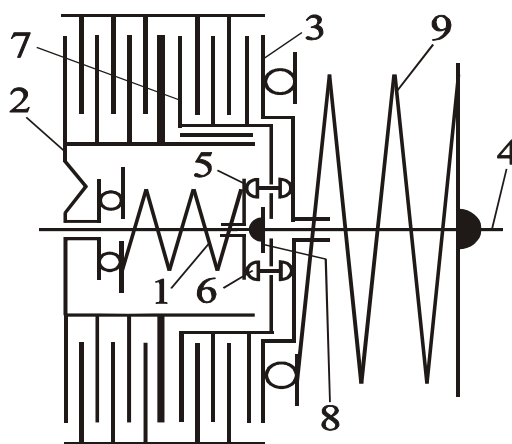


Рисунок 5. Принципиальная схема № 3 силового замыкания

емых парами трения ОФГ и парами трения ДФГ в отдельности, выявил более быстрое увеличение распорной силы от вращающего момента пар трения ДФГ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М. П. Шишкарев, А. Ю. Угленко // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2015. – № 3. – С. 36–41.
2. Шишкарев, М. П. Точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М. П. Шишкарев, А. Ю. Угленко // Вестник ДГТУ. – 2014. – Т. 14. – № 1 (76). – С. 200–203.
3. Шишкарев, М. П. Исследование эксплуатационных характеристик адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М. П. Шишкарев, А. Ю. Угленко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 4. – С. 21–26.
4. Шишкарев, М. П. Эксплуатационные характеристики адаптивной фрикционной муфты второго поколения с отдельным силовым замыканием / М.П. Шишкарев, А. А. Лущик // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 3. – С. 28–31.
5. Шишкарев, М. П. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения / М. П. Шишкарев, А. Ю. Угленко // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2012. – № 10. – С. 3–6.
6. Шишкарев, М.П. Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М. П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2005. – № 12. – С. 17–18.
7. Шишкарев, М. П. Аналитическое обоснование оптимального способа настройки предохранительных фрикционных муфт / М. П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 3–6.
8. Шишкарев, М. П. Обоснование наибольшей точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015. – № 11. – С. 20–26.
9. Шишкарев, М. П. Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения / М.П. Шишкарев, Чан Ван Дык // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 9. – С. 42–45.
10. Шишкарев, М. П. Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт первого поколения с дифференцированными парами трения / М. П. Шишкарев // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4. – С. 36–39.

Поступила в редколлегию 17.03.2022 г.

УДК 629.1.01

¹И. А. Яицков, д-р техн. наук, доцент, ^{1,2}П. А. Поляков, канд. техн. наук, доцент,³Н. А. Задаянчук, ²Н. А. Гончарова, магистрант¹Ростовский государственный университет путей сообщения, РФ²Кубанский государственный технологический университет, РФ³Кубанский государственный университет, РФ¹E-mail: via_nis@rgups.ru, ²E-mail: polyakov.pavel88@mail.ru,³E-mail: nina-nuska@mail.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Проанализированы перспективные направления и разработки в области колесных тормозных механизмов. Особое внимание уделено описанию созданных мехатронных систем тормозных механизмов, позволяющих дифференцировано управлять процессом торможения отдельно каждого тормозного устройства. Приведены расчеты эксплуатационных характеристик тормозных механизмов, на основании которых сформулированы принципы создания и модернизации перспективных разработок пар трения тормозных механизмов. Основными требованиями, предъявляемым к проектируемым и совершенствуемым конструкциям тормозных механизмов являются следующие утверждения: применения принципа дифференцированного взаимодействия прижимающего элемента, тормозной колодки и рабочей поверхности металлического фрикционного элемента; перепад тормозного момента по площади рабочей поверхности должен быть не ниже 75%; отслеживание прилагаемого усилия при взаимодействии прижимающего элемента с рабочими поверхностями тормозного механизма.

Возрастание тормозного момента приведет к увеличению энергоемкости рабочих пар тормозных механизмов. Из данного факта вытекает следующее утверждение, что модернизация узла охлаждения или его разработка должны быть связаны с эксплуатационными параметрами рабочих поверхностей пар трения тормоза. Предложены несколько концепций развития узлов охлаждения тормозных механизмов.

Ключевые слова: тормозной механизм дисково- и барабанно-колодочного типа, прижимающий элемент, дифференцированное взаимодействие, тормозной момент, принудительное охлаждение, пористое охлаждение.

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

PROSPECTS AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF BRAKING SYSTEMS MECHANISMS OF VEHICLES

The perspective directions and developments in the field of wheel braking mechanisms are analyzed. Special attention is paid to the description of the created mechatronic systems of braking mechanisms that allow differentiated control of the braking process separately of each braking device. Calculations of the performance characteristics of braking mechanisms are given, on the basis of which the principles of creation and modernization of promising developments of friction pairs of braking mechanisms are formulated. The main requirements for the designed and improved designs of braking mechanisms are the following statements: the application of the principle of differentiated interaction of the clamping element, the brake pad and the working surface of the metal friction element; the difference in braking torque over the area of the working surface must be at least 75%; tracking the applied force when the clamping element interacts with the working surfaces of the braking mechanism.

An increase in the braking torque will lead to an increase in the energy intensity of the working pairs of braking mechanisms. This fact implies the following statement that the modernization of the cooling unit or its development should be related to the operational parameters of the working surfaces of the brake friction pairs. Several concepts for the development of brake cooling units are proposed.

Keywords: disc- and drum-and-pad type braking mechanism, clamping element, differentiated interaction, braking torque, forced cooling, porous cooling.

Введение

В процессе исследований тормозная система транспортных средств усложняется. Появляются досточно большое количество концептуальных идей, связанных с управлением процессом торможения, что напрямую отражается на безопасной эксплуатации транспортных средств.

Перспективными разработками тормозных систем транспортных средств занимались ряд отечественных и зарубежных ученых, включая Рудова П.К. [1], Туренко А.Н. [2], Носко А.Л. [3], Вольченко А.И. [4], Mortazavi V. [5], Panelli M. [6], Sergent N. [7], Vdovin, A. [8].

Корпорация Siemens создала концептуальную модель тормозных механизмов дисково-колодочного типа, управление привода происходит с помощью электродвигателей и клинового механизма (рис. 1). Система электронного клинового тормоза использует принцип заключается в воздействии клина на тормозную колодку.

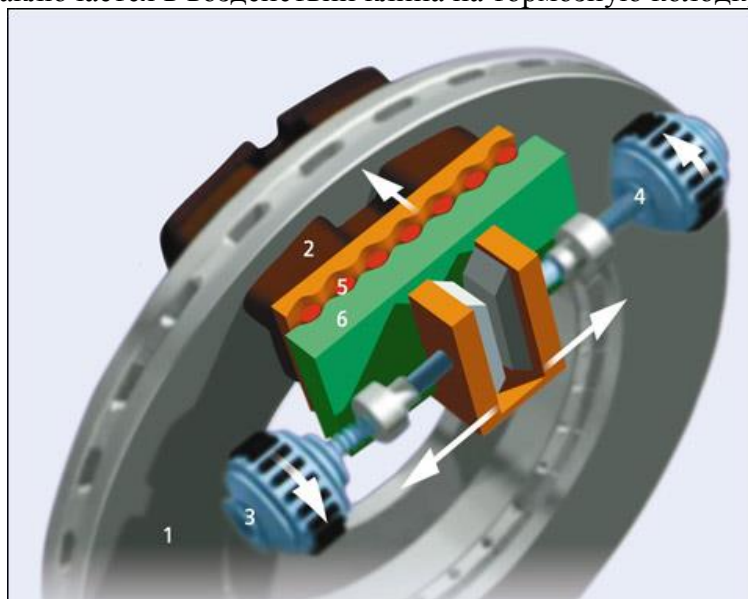


Рисунок 1. Система электронного клинового тормоза

В плавающем суппорте дисково-колодочного тормоза (1) нет места поршню и каналы каналов подачи тормозной жидкости. Вместо них в суппорте устанавливаются две параллельные пластины (6), с одной стороны они имеют гладкую поверхность, а с другой на поверхности расположены клиновидные зубья. Обе пластины расположены друг к другу таким образом, чтобы клиновидные зубья находились напротив друг друга, а в углублениях зубьев расположены небольшие цилиндрические ролики (5). Также как и в суппорте серийного тормозного механизма, одна тормозная колодка с фрикционной накладкой (2) опирается на внутреннюю пластину, а внешняя колодка опирается на плавающую часть суппорта. Два небольших электродвигателя (3 и 4), также находящиеся в суппорте, перемещают один клин тормозного суппорта относительно другого. В результате при нажатии на педаль тормозной системы клины приводятся в движение, перемещают одну пластину относительно другой и прижимают колодки к диску. Преимуществом системы управления тормозным усилием является эффект серводействия, т.е. клин автоматически усиливает прилагаемое тормозное усилие.

Согласно проводимым расчетным данным [9] контактное давление на взаимодействующих поверхностях определяет величину силы трения и тормозного момента

всего фрикционного узла тормозного механизма. Это тормозное устройство относится к «мехатронному» решению, не использующему никаких гидравлических систем, работает на от штатной бортовой сети автомобиля. Преимуществом является его компактность, постоянное взаимодействие с антиблокировочной системой и открывает возможность реального дифференцированного торможения.

К недостаткам данного устройства можно отнести сложность управления на автомобилях большой грузоподъемности, не говоря уже о железнодорожном транспорте. Как и в серийных тормозных механизмах дисково-колодочного типа не решена проблема неравномерного износа фрикционной накладки по площади рабочей поверхности. При длительной эксплуатации электродвигатели будут работать неравномерно, что приведет к смещению положения центра давления в паре «фрикционная накладка – тормозной диск».

Компания Protean представила концепцию мотор-колеса, соединяющего в себе движитель и тормоз в единое целое (рис. 2). Движителем является тороидальный электродвигатель, устанавливаемый в объем между колесом автомобиля и его ступицей. Тормозом является модифицированный тормозной механизм дисково-колодочного типа, рабочие поверхности, которого уменьшены по сравнению с серийными аналогами.

На рис. 2, б показано изображение тормозного механизма в процессе торможения во время испытания на растрескивание диска. В ходе этих испытаний температура тормозного диска превышала 600°C , а температура ротора электродвигателя никогда не превышала 80°C в течение нескольких циклов, что продемонстрировало эффективную теплоизоляцию системы крепления катушки.

Преимуществом разработанного прототипа «мотор-колеса» с дисково-колодочным тормозом является компактность и заполнение объема обода колеса автомобиля. Помимо этого постоянный мониторинг процесса разгона и торможения каждого колеса автомобиля.

Существенным недостатком является минимальный зазор между ободом колеса и поверхностями тормозного диска, что существенно замедляет процесс конвективного теплообмена.

а)



б)



Рисунок 2 а, б. Мотор-колесо компании Protean: в неподвижном положении (а) и в процессе торможения (б).

Из анализа работ исследователей и концепций можно сделать вывод о том, что модернизация тормозной системы автомобилей заключается в возможности создания адаптированных систем управления приводом тормозных механизмов. Поиск новых решений, связанных с мехатронными системами, монтируемыми на стандартизированные тормозные механизмы. Как показывает анализ изменения конструкции тормозных механизмов дисково-колодочного типа, а тем более барабанно-колодочного типа не производится по причине нерентабельности, связанной с эксплуатацией и дальнейшей утилизацией элементов (тормозных колодок) тормозных механизмов.

Анализ эксплуатационных критериев оценки эффективности тормозных механизмов

Согласно проводимым расчетным данным (табл. 1, 2, 3) тормозных механизмов различных типов транспортных средств, с установленными разными тормозными механизмами, основной критерий, а именно тормозной момент, имеет большой перепад по площади рабочих поверхностей металлического тормозного элемента.

Таблица 1. – Результаты расчетов эксплуатационных параметров тормозного механизма дисково-колодочного типа легкового автомобиля

Исходные параметры		Результаты расчетов		
	прижимающий механизм	расчет эксплуатационных параметров рабочих поверхностей		
	однопоршневой	с 6 поршнями	однопоршневой	с 6 поршнями
p , МПа	0,55	$\max M_T$, Нм	627,4	704,3
ω , c^{-1}	0,7	$\min M_T$, Нм	361,7	527,3
D , м	0,32	$M_{ТПЩД}$, Нм	494,5	602,6
d_{cm} , м	0,165	r_y , м	0,121	0,136
B , м	0,077	q_z , Вт	346,2	421,8
δ , м	0,012	T , К	600	603,2
f	0,3	T_m , К	592	596
θ , град.	120	E_T , Вт/К	0,585	0,653
σ_{mm}	0,7	$L_A - L/2$, м	0,00432	0,0022
v , м/с	8	K_{cm}	0,788	0,85
τ_m , с	15	$K_{ккм}$	0,576	0,749

Согласно результатам расчетов эксплуатационных параметров тормозного механизма дисково-колодочного типа легкового автомобиля разница между максимальным и минимальным значениями тормозных моментов для однопоршневых суппортов составляет 265,7Нм, тогда как для шестипоршневых суппортов перепад тормозного момента – 177Нм. Таким образом увеличение количества прижимающих элементов незначительно стабилизирует тормозной момент. Коэффициенты стабилизации и колебания тормозного момента увеличиваются и стремятся к единице, что позволяет эксплуатировать более совершенную конструкцию тормозного механизма.

Данное положение складывается из следующей ситуации, что помимо индивидуальности прижимающих элементов имеется общий элемент – тормозная колодка с фрикционной накладкой.

Таблица 2. – Результаты расчетов эксплуатационных параметров тормозного механизма дисково-колодочного типа грузового автомобиля

Исходные параметры			Результаты расчетов		
	прижимающий механизм		расчет эксплуатационных параметров рабочих поверхностей		
	однопоршневой	с 2 поршнями		однопоршневой	с 2 поршнями
p , МПа	0,51		$\max M_T$, Нм	1291,7	1295
ω , c^{-1}	1,4		$\min M_T$, Нм	705,5	728
D , м	0,407		$M_{ТПЩ}$, Нм	998,6	985,7
d_{cm} , м	0,22		r_{ν} , м	0,155	0,153
B , м	0,094		q_z , Вт	1398,0	1379,9
δ , м	0,014		T , К	693	678
f	0,3		T_m , К	681	664
Θ , град.	130		E_T , Вт/К	2,09	2,07
σ_{mm}	0,7		$L_A - L/2$, м	0,0073	0,00441
v , м/с	8		K_{cm}	0,77	0,76
τ_m , с	15		K_{kmm}	0,546	0,56

Таблица 3. – Результаты расчетов эксплуатационных параметров тормоза барабанно-колодочного типа грузового автомобиля

Исходные параметры			Результаты расчетов		
	прижимающий механизм			прижимающий механизм	
	Simplex	Servo		Simplex	Servo
Θ , град.	160		расчет эксплуатационных параметров рабочих поверхностей		
β , град.	0	20	$\max P_{ni}$, кН	2,2	6,77
γ , град.	20		$\min P_{ni}$, кН	0,021	0,07
P_n , кН	22		$\max P_{oi}$, кН	7,5	7,76
d_{θ} , м	0,396		$\min P_{oi}$, кН	0,024	0,062
τ_m , с	15		$\max M_{Ti}$, Нм	1920,6	2876,9
τ_o , с	15		$\min M_{Ti}$, Нм	17,8	52,3
n	5		$M_{T_{cp}}$, Нм	969,2	1464,6
f	0,3		K_{cm}	0,5	0,51
v , м/с	8		K_{kmm}	0,009	0,018
δ , м	0,012		q_z , Вт	1356,8	2049,6
ω , c^{-1}	1,4		T , К	676	723
α_l , Вт/м ² К	50		T_m , К	661	708
σ_{mm}	0,7		E_T , Вт/К	2,05	2,89

У расчетных данных эксплуатационных параметров тормозного механизма дисково-колодочного типа грузового автомобиля наблюдается схожая картина. Параметры максимального и минимального значений тормозного момента разнятся: для однопоршневого суппорта перепад тормозного момента по площади 586,2Нм, а для двухпоршневого значение перепада тормозного момента 567Нм. Отличием является тот факт, что с увеличением до двух прижимающих элементов тормозной момент в положении центра давления будет меньше, чем при использовании однопоршневого суп-

порта. Коэффициенты стабилизации и колебания тормозного момента по площади рабочей поверхности фрикционного узла будут далеки от идеала и меньше значений, чем у прижимающих механизмов тормозных устройств легковых автомобилей.

Анализируя результаты расчетов тормозных механизмов барабанно-колодочного типа [10] для двух различных компоновок Simplex и Servo можно сказать, что изменения тормозного момента по длине тормозных колодок неравномерно. Однако с использованием компоновки Servo среднее значение тормозного момента возрастает в 1,5 раза. Но критерии эффективности тормозного механизма остаются на недопустимо низком уровне: коэффициент стабилизации 0,51, а коэффициент колебания тормозного момента на уровне 0,18.

Эти критерии доказывают, что пиковая величина тормозного момента барабанно-колодочного тормоза выше в 2,2 раза, чем для тормоза дисково-колодочного типа, но использования имеющегося потенциала у тормозных механизмов далеко не на пределе.

Таким образом, целью дальнейших исследований является создание или модернизация существующих колесных тормозных механизмов, которые могли бы использовать имеющийся потенциал тормозного момента близкий к значениям 85...95%.

Формулирование требований перспективных тормозных механизмов и их отдельных узлов

Для разработки перспективных тормозных механизмов необходимо сформулировать следующие требования:

- применения принципа дифференцированного взаимодействия прижимающего элемента, тормозной колодки и рабочей поверхности металлического фрикционного элемента;
- перепад тормозного момента по площади рабочей поверхности должен быть не ниже 75%;
- отслеживание прилагаемого усилия при взаимодействии прижимающего элемента с рабочими поверхностями тормозного механизма.

Кроме этого увеличение значений тормозного момента и индивидуализация взаимодействия прижимающих элементов с рабочими поверхностями металлического фрикционного элемента приведет к увеличению энергоемкости рабочих пар тормозных механизмов. Необходимо предусмотреть и совершенствование, и разработку систем управления узлом охлаждения.

В ходе этого исследования [11] была разработана новая система охлаждения для предотвращения перегрева в процессе торможения. В этой системе процесс охлаждения элементов дисково-колодочного тормоза происходит не при естественном режиме, а с помощью системы принудительного охлаждения с использованием мелких капель воды, распыляемых на суппорт (рис. 3). Во время процесса торможения температура суппорта контролировалась с помощью датчиков температуры, и при повышении температуры происходит автоматическое распыление. Этот метод зарекомендовал себя как наиболее эффективный способ снижения температуры суппорта [12]. Этап проектирования этой системы охлаждения завершен, особенно для тормозной системы легких транспортных средств. Результаты проектирования реализованы на масштабных моделях и протестированы в лаборатории.

Другим направлением совершенствования узлов охлаждения являются узлы охлаждения, совмещенные с принудительной системой воздушного охлаждения. Важным отличием от существующих систем подачи воздуха в вентиляционные каналы яв-

ляется применения пористых вставок в вентиляционный аппарат тормозного диска [13].



Рисунок 3. Система капельного охлаждения тормозного механизма дисково-колодочного типа

Таким образом, на основании полученных результатов, можно утверждать, что охлаждение в тормозном механизме будет подчиняться зависимостям аналогии Рейнольдса [14]. С увеличением коэффициента аэродинамического сопротивления на трение воздушного потока о поверхности узла охлаждения возрастает отвод тепла от нагретых поверхностей. С учетом пористого материала вставок в вентиляционном аппарате тормозного диска трение воздушного потока возрастает в разы, по сравнению со стандартными оребренными и сегментными вентиляционными аппаратами.

Заключение.

Проанализированные концептуальные модели мехатронных систем, внедренные в тормозные механизмы транспортных средств позволяют сделать вывод о том, что перспективные разработки тормозных механизмов различных типов должны быть связаны не только с дифференцированностью колес транспортного средства, но и с дифференцированностью взаимодействующих площадок рабочих поверхностей фрикционного узла. Оценка эксплуатационных параметров показала, что существующие фрикционные узлы не используют свой потенциал рабочих поверхностей по критерию эффективности торможения. Поэтому целесообразно создавать тормозные механизмы, которые обладали бы коэффициентами стабильности и колебаний тормозного момента не ниже границы в 75%. С ростом эффективности торможения, создаваемые и модернизированные тормозные механизмы, будут воспринимать большую энергоемкость, что должно приводить к совершенствованию или разработке узлов охлаждения. Узлы охлаждения должны работать в нескольких режимах охлаждения и использовать физические свойства различных материалов, встроенных в вентиляционный аппарат (пористые материалы). На основании аналогии Рейнольдса, пористые материалы в сумме с принудительным воздушным охлаждением дадут эффект увеличенного теплоотвода от рабочих поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Галай, Э. И. Исследование тормозных процессов в грузовых поездах с электровозами БКГ1 и ВЛ80С на белорусской железной дороге / Э. И. Галай, П. К. Рудов, Е. Э. Галай // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 4(68). – С. 210-219. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.4(68).210-219.
2. Функциональный расчет параметров пневматического модулятора АБС с электронным управлением / А. Н. Туренко, С. И. Ломака, Л. А. Рыжих [и др.] // Автомобильный транспорт (Харьков). – 2007. – № 20. – С. 7-10.

3. Исследование фрикционно-износных характеристик пары трения тормозного ролика центробежного типа / Носко А. Л., Сафронов Е. В., Соловьев В. А. // Трение и износ. – 2018. – Т. 39. – № 2. – С. 184-191.
4. Гидродинамические параметры мокрых пар трения дисково-колодочного тормоза транспортного средства / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, М. М. Насирова [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 32-42. – DOI 10.52171/2076-0515_2021_13_01_32_42.
5. Mortazavi, V. Stability of Frictional Sliding With the Coefficient of Friction Depended on the Temperature / Mortazavi V., Chuanfeng Wang, Nosonovsky M. // Journal of Tribology. – vol. 134. – 2012. – P.7. – DOI: [10.1115/1.4006577](https://doi.org/10.1115/1.4006577).
6. Panelli, M. Thermal fluid dynamics analysis of vented brake disc rotor with ribs turbulators / Panelli M. // Conference: International conference: Thermal and Enviromental Issues in Energy Systems, ASME-UIT-ATI, Sorrento, Italy. 2010. – p. 7. – DOI: [10.13140/2.1.3525.7122](https://doi.org/10.13140/2.1.3525.7122).
7. Sergent, N. Design optimization of an opposed piston brake caliper. Engineering Optimization. / Sergent N., Tirovic M., Voveris J. – 2014. – DOI: [10.1080/0305215X.2013.8463379](https://doi.org/10.1080/0305215X.2013.8463379).
8. Vdovin, A. A coupled approach for vehicle brake cooling performance simulations. / Vdovin, A., Gustafsson, M., Sebben, S. // International Journal of Thermal Sciences. – 2018. – Vol 123. – pp. 257-266. – <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.05.016>.
9. Поляков, П. А. Разработка математической модели фрикционного узла дисково-колодочного тормоза автомобиля. / Поляков П. А., Тагиев Р. С., Мищенко В. А., Голиков А. А. // В сборнике: МЕХАНИКА, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ. Электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. 2019. – С. 245-251.
10. Поляков, П. А. Метод проектирования современных тормозных механизмов с сервоусилением / П. А. Поляков, Е. С. Федотов, Е. А. Полякова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 7(126). – С. 39-50.
11. Dewanto, J. New Active Cooling System to Prevent an Overheating on the Vehicle Disc Brake. / Dewanto J., Soegihardjo O., Wijaya A.N.R. // International Journal of Industrial Research and Applied Engineering. – 2018. – Vol. 3. – № 1. – pp. 1-6. – DOI: [10.9744/jirae.3.1.1-6](https://doi.org/10.9744/jirae.3.1.1-6)
12. Radhakrishnan, C. Design and Analysis of Disc Brake with Titanium Alloy / Radhakrishnan, C., Yokeswaran, K., Vengadesprasadh, M., Visnuhasan, A., Vimalraj, T., and Velusamy, M. // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. – 2(5), May 2015. –, pp. 1044–1050.
13. Поляков, П. А. Исследование сегментарного вентиляционного аппарата тормозного диска с определением взаимосвязи аэродинамических и теплообменных характеристик воздушного потока / П. А. Поляков // iPolytech Journal. – 2021. – Т. 25. – № 6(161). – С. 720-732. – DOI [10.21285/1814-3520-2021-6-720-732](https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-6-720-732)
14. Поляков, П. А. Связь между режимом протекания воздушного потока и теплоотдачей от поверхностей вентиляционного аппарата тормозного диска / П. А. Поляков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 8. – С. 184-190. – DOI [10.24412/2071-6168-2021-8-184-190](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-8-184-190).

Поступила в редколлегию 12.03.2022 г.

УДК 621.793.7:621.762

¹ **F. I. Panteleenko**, Member-cor.NAS of Belarus, doc. of Techn. Sciences, Prof.,
V. A. Okovity, Cand. of Techn. Sciences, **O. G. Devoino**, Doc. of Techn. Sciences, Prof.,
A. S. Volodko, **V. V. Okovity**, **A. A. Litvinko**,

² **V. M. Astashinsky**, member-cor.NAS of Belarus Doc. of Techn. Sciences, Prof.,

¹ Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Тел./Факс +375 17 293-95-99, niil_svarka@bntu.by

² A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Тел./Факс +375 17 284-24-91, ast@hmti.ac.by

HIGH-ENERGY LASER TREATMENT OF PLASMA COATINGS FROM MATERIALS BASED ON OXIDE CERAMICS

The article studied and optimized the technological parameters of hardening by pulses of laser radiation of sprayed coatings from materials based on oxide ceramics using additives of refractory metals. According to the methodological approach, when varying the technological parameters, the radiation power density and the total number of laser beam pulses in the treatment spot were changed. The optimization criterion is the maximum degree of local melting and densification of the sprayed compositions in the absence of signs of coating destruction under the influence of radiation. The microstructure of coatings obtained under optimized processing conditions is considered. During reflow, chemical interaction at the boundaries of the main phases of the applied compositions is activated. The products of chemical interaction can be finely dispersed (including nanoscale) formations that strengthen the boundaries of the main phases and the coating as a whole.

Keywords: ceramic coating, plasma spraying, laser radiation, parameter optimization, refractory metals.

Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О.Г. Девойно, А. С. Володько, В. В. Оковитый, А. А. Литвинко, В. М. Асташинский

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЛАЗЕРОМ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

В статье изучены и оптимизированы технологические параметры упрочнения импульсами лазерного излучения напыленных покрытий из материалов на основе оксидной керамики с использованием добавок тугоплавких металлов. Согласно методического подхода, при варьировании технологических параметров изменяли плотность мощности излучения и суммарное количество импульсов лазерного луча в пятне обработки. Критерием оптимизации режимов является максимальная степень локального плавления и уплотнения напыляемых композиций при отсутствии признаков разрушения покрытия под излучения. Рассмотрена микроструктура покрытий, полученных на оптимизированных режимах обработки.

При оплавлении активизируется химическое взаимодействие на границах основных фаз нанесенных композиций. Продуктами химического взаимодействия могут быть тонкодисперсные (в том числе наноразмерные) образования, которые упрочняют границы основных фаз и покрытие в целом.

Ключевые слова: керамическое покрытие, плазменное напыление, лазерное излучение, оптимизация параметров, тугоплавкие металлы.

1. Introduction.

The technique for optimizing the laser processing process is based on the need to obtain hardened amorphous or nanocrystalline coating structures that are the object of research. For this, severe operating modes are most applicable, the optimization of which is based on the maximum possible degree of local melting of the sprayed powder compositions with no

signs of thermal destruction on their surface. The number of crystallization (amorphization) centers of the material from which hardened structures develop during ultrafast cooling directly depends on the degree of short-term melting of the composition containing various phases (including refractory ones) [1]. As technological equipment, we used a solid-state quasi-stationary laser emitter, which makes it possible to process coatings with pulses up to 4 ms in duration, obtained in the free-running mode. An important component of this technology is the processing environment. It is most expedient to use nitrogen for protection against oxidation, while heat removal from the processed material becomes difficult, which is important in the formation of hardened nanostructured and amorphous phases [2-4]. For the process of optimizing hard modes of laser processing according to the mentioned criterion, it is desirable to investigate the effect of the power density of the laser radiation pulse on the degree of fusion of the deposited compositions. When varying the power density, it was also taken into account that the shape of the radiation pulses from solid-state lasers in the free-running mode is determined by the shape of the pump current pulses [5]. Together with the power density, the total number of pulses in the treatment spot was also optimized. This technological parameter affects the thickness of the treated layers of the coating [9]. For wear-resistant coatings, it is necessary to obtain increased cohesive and adhesive strength during spraying. Consequently, the total number of pulses must ensure the melting and densification of the obtained coatings over the entire thickness, which will contribute to the production of hardened nanocrystalline or amorphous structures due to the factors mentioned above. Evaluation of the degree of fusion and compaction was carried out by examining thin sections of the cross-section of the treated coatings on a MeF-3 metallographic microscope (Reichert, Austria) and on an AutoScan image analyzer. When studying the properties of the obtained compositions during processing at optimal conditions, the creation of hardened nanocrystalline and amorphous structures corresponded to an increase in the average microhardness of composite materials in comparison with untreated plasma coatings [10].

2. Optimization of processing of plasma coatings made of materials based on oxide ceramics.

According to the applied methodological approach, when changing the technological parameters, the radiation power density and the total number of pulses in the processing spot were changed. Table 1 shows the results of optimizing the power density. The optimal radiation power densities (W) for processing $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ compositions obtained by agglomeration of a fine charge followed by high-temperature sintering are in the range of $(4.0 - 6.5) \times 10^5 W / cm^2$, and for $Al_2O_3-TiO_2-12\% (MoS_2-Ni)$ obtained by the SHS method are in the range of $(3.5 - 6.0) \times 10^5 W/cm^2$. This is confirmed by the dynamics of increasing the degree of melting of the treated compositions and changes in porosity, the desired reduction of which (according to the optimization criterion) does not occur at W greater than 6.0 and $6.5 \times 10^5 W/cm^2$. The decrease in the efficiency of heat transfer can be explained by the significant content of the refractory oxide phase in the obtained coatings (more than 80%), which accordingly prevents an increase in the degree of melting and compaction of the coatings. With a further increase in W , undesirable thermal destruction of the surfaces of the processed materials is observed. In addition to the power density of pulsed radiation, the total number of laser beam pulses in the treatment spot was optimized for the formation of completely fused coatings over the entire thickness (0.5 – 0.6 mm). Metallographic analysis of non-etched grinds revealed that the required number of pulses for coatings obtained from $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ powders obtained by the SHS method is 4-5 impacts, and for coatings made from $Al_2O_3-TiO_2-12\%(MoS_2-Ni)$ powders obtained by agglomeration of fine charge followed

by high-temperature sintering-3-4. Additional pulses do not give an additional effect, since their repeated repetition only worsens the geometry of the resulting coating surface due to thermal destruction. This complicates the final mechanical processing of the formed materials, since the allowance increases, which should be minimal due to the significant cost of the coating materials used and the problematic nature of their processing due to hardness and wear resistance. The total number of laser radiation pulses according to the results obtained is significantly less in comparison with the pulses of the compression plasma jet (11-14) when exposed to the same coatings. This can be explained by the duration of the impacts, which is 4ms and 400 microseconds, respectively.

Table 1. – Results of power density optimization studies

Coating	The power density of the laser beam pulse, x 10 ⁵ W / sm ²	The porosity index on the sections of the treated coating, %
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -12% (MoS ₂ -Ni) (SHS)	3,5	3,3 – 4,1
	4,5	3,0 – 3,7
	5,5	2,8 – 3,4
	6,0	2,5 - 3,0
	6,5	2,7 – 3,2
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -12% (MoS ₂ -Ni) (agglomerations)	4,0	4,0 – 4,7
	5,0	3,4 – 3,8
	6,0	3,2 – 3,6
	6,5	3,1 – 3,4
	7,0	3,3 – 3,5

Table 2. – Optimized technological parameters of pulsed laser processing

Coating	Modes of coating treatment with a pulsed laser beam	
	The power density of the laser beam pulse, x 10 ⁵ W / sm ²	The porosity index on the sections of the treated coating, %
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -12% (MoS ₂ -Ni) (SHS)	5,5-6,0	4-5
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -12% (MoS ₂ -Ni) (agglom.)	6,0-6,5	3-4

With a significantly longer duration of exposure, the zone of concentration of the supplied energy and the thickness of the layer increases when treated with a single pulse of laser radiation, while the total number of impacts for melting coatings over the entire thickness decreases. The results of research on the optimization of technological parameters are presented in Table 2 (the diameter of the treatment spot is 8.0 mm).

3. Study of coatings with a modified structure obtained using optimized laser radiation pulse processing modes

Figure 1 shows the microstructure of coatings formed under optimized processing modes. As in the case of the technology of compression plasma effects, the layers of the obtained coatings are fused metal-ceramic material. During the melting process, the chemical interaction is activated at the boundaries of the main phases of the formed compositions. The

resulting products during chemical interaction can be finely dispersed formations that significantly strengthen the boundaries of the main phases and the entire coating as a whole. A fairly uniform distribution of structural elements is obtained. This helps to increase the wear resistance of the obtained compositions. The geometry of the surface of the obtained coatings in comparison with the sprayed material (without subsequent laser treatment) is characterized by a decrease in the height of the micro-dimensions. Due to the optimization of the technological characteristics of laser radiation, there are no “craters” of thermal destruction of the formed surface. As with compression plasma effects, the etching of its elements becomes more complicated. A significant increase in the number of non-etched areas indicates the presence of hardened amorphous structures in the coatings with high corrosion resistance, which are difficult to dissolve in acid etchants. In accordance with the method, when studying the properties of the obtained coatings, their average microhardness (H) was estimated. The change in the parameter H for various compositions is illustrated in Figure 2. Compared with compression plasma treatment, there is a noticeable decrease in microhardness, this is explained by a decrease in the degree of locality of melting of the material from exposure to a laser radiation pulse. The melt cooling rate is also reduced due to the heat removal into the sample substrate. The degree of grinding of its grain structure and the value of the parameter H, the number of amorphous phases of the coating are reduced. The results obtained indicate that, along with compression plasma treatment, the laser technology under consideration allows improving the properties of coatings made of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ powders obtained by the SHS method and the method of agglomeration of fine charge with subsequent high-temperature sintering.

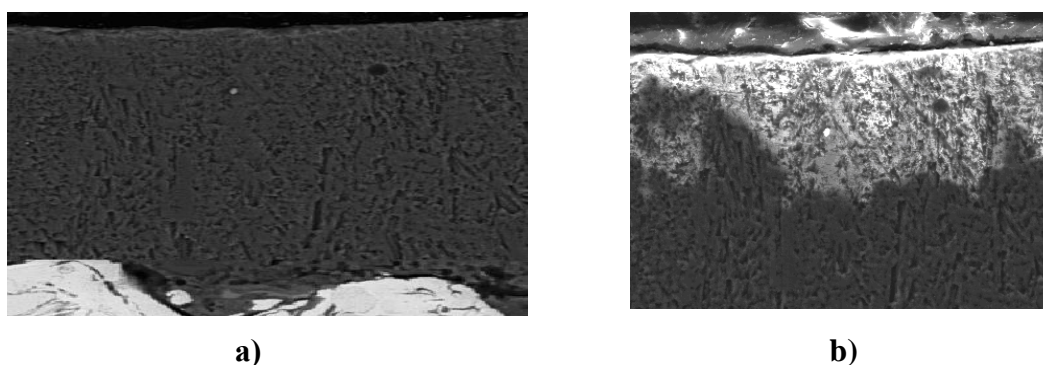


Figure 1. The microstructure of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ (x 500) coating after treatment with laser radiation pulses: a-the SHS method; b - the method of agglomeration of a fine charge followed by high-temperature sintering.

4. Conclusion.

1. The technological parameters of high-energy processing of sprayed plasma coatings made of materials based on oxide ceramics with the use of additives of refractory metals obtained by self-propagating high-temperature synthesis and agglomeration of a fine charge with subsequent high-temperature sintering are investigated and optimized. The optimization was carried out in the study of the processes of structure formation during melting, compaction and high-speed cooling of coatings. The main optimization criterion was the maximum degree of local melting, compaction of the formed compositions in the absence of signs of destruction from the effects of laser radiation pulses. The impact energy was generated using a solid-state quasi-stationary laser emitter.

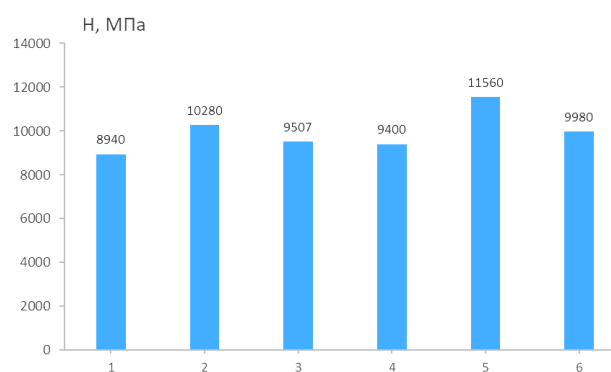


Figure 2. Microhardness of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ coatings (1, 2, 3 - agglomeration; 4, 5, 6 - SHS): 1, 4-after plasma spraying; 2, 5-after compression plasma treatment of sprayed materials; 3, 6-after treatment with a pulsed laser beam.

2. Based on the metallographic analysis of non-etched grinds, it was revealed that the required number of laser radiation pulses for coatings made of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ powders obtained by agglomeration of a fine charge followed by high-temperature sintering is 3-4, and for coatings made of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ powders obtained by the SHS method is 4 - 5 effects. The optimal radiation power densities (W) for processing $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ compositions obtained by agglomeration of a fine charge followed by high-temperature sintering are in the range of $(4.0 - 6.5) \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, and for $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-12\%}(\text{MoS}_2\text{-Ni})$ obtained by the SHS method are in the range of $(3.5 - 6.0) \times 10^5 \text{ W/cm}^2$. The total number of laser radiation pulses is significantly less in comparison with the pulses of the compression plasma jet (11-14) when exposed to the same coatings. This is explained by the duration of the impacts, which is 4ms and 400 microseconds, respectively. With a longer duration, the total number of impacts for melting coatings over the entire thickness decreases.

LITERATURE

1. Okovityi, V. A. Modification of plasma wear-resistant coatings by pulse laser / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Shevtsov A. I., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V., // Bulletin of the Brest State Technical University. Mechanical engineering. – Brest, 2009. – Issue 4(58). – P. 49-53 .
2. Okovity, V. A. Obtaining a composite ceramic material for applying wear-resistant coatings / Okovity V. A., Ilyushenko A. F., Shevtsov A. I., Panteleenko F. I., Okovity V. V. // Powder metallurgy. – Minsk.: Belorusskaya nauka, 2008. – Issue 31. – P. 156-162.
3. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ Okovity V // J. Welding International. – 2003. – Vol. 16. – No 11. – P. 918-920.
4. Velikovich, L. Physics of shock waves in gases and plasma / L. Velikovich, M. Lieberman – Moscow: Nauka, 1987. – 284 p.
5. Yetrehus, T. Asymmetries in evaporation and condensation Knudsen layer problem [Text] / T. Yetrehus // Phys. Fluids. – 1983. – V. 26. – No 4. – P. 939-949.
6. Vakulenko, V. M. Power sources of lasers [Text] / V. M. Vakulenko, A. P. Ivanov. - M.: Sovetskoe radio, 1980. – 102 p.
7. Kalita, V. I. On the question of the mechanism of formation of an amorphous structure in metal alloys during plasma sputtering / V. I. Kalita, D. I. Komlev // Metals. – 2003. – No. 6. – P. 30-37.

8. Bergstrom, T. Gas motion in front of a completely absorbing wall / T. Bergstrom, T. Ytrehus // *Ibid.* – 1984. – V. 27. – No 3. – P. 583 – 588

9. Okovity, V. A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a non-equilibrium structure / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Astashinsky V. M., Okovity V. V. // *Science and Technology, BNTU-Minsk.* – 2018. – Issue.3. – P. 183-189.

10. Okovity, V. A. Formation and research of plasma powder coatings from oxide ceramics modified by high-energy influences " *Science and Technology*" / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Uglov V. V. // *Science and Technology, BNTU-Minsk.* – 2018. – Issue.5. – P. 377-389.

Received by the editors 21.03.2022

СОДЕРЖАНИЕ

Бутенко В. И., Корольков Ю. В. ТЕМПЕРАТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ	3
Васильева М. А., Волчихина А. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНЕРЦИОННОГО СГУСТИТЕЛЯ	9
Горобец И. А. УСТРОЙСТВО И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ ОПОРНОЙ СИСТЕМЫ БЕСЦЕПНЫХ УСТРОЙСТВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ	15
Грубка Р. М., Долматова М. В., Сазоненко Ю. В. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С ПРОСТРАНСТВЕННО- МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ЗУБЧАТЫМИ ВЕНЦАМИ	21
Гуляев Н. А., Яровая Е. И., Леушин И. О., Гусев Г. А. ФРАКТАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ В ОЦЕНКЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ 20ГЛ	29
Колганова Е. Н., Мельникова Е. П., Лебедев В. А., Шишкина А. П. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВИБРАЦИОННОЙ ОТДЕЛОЧНО- ЗАЧИСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	34
Мартюшова А. А. ВЫЯВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ СОЕДИНЕНИЯ «НИППЕЛЬ АЛМАЗНОГО ДОЛОТА – ПЕРЕВОДНИК» ПРИ СБОРКЕ	41
Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ПО УЧАСТКАМ И ЗОНАМ ПРОФИЛЯ ТРУБЫ МАСЛООХЛАДИТЕЛЯ	46
Овчинников Е. В. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГИБРИДНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ	57
Шишкарев М. П. АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ С РАЗДЕЛЬНЫМ СИЛОВЫМ ЗАМЫКАНИЕМ	68

Яицков И. А., Поляков П.А., Задаянчук Н. А., Гончарова Н. А.
ПЕРСПЕКТИВЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТОРМОЗНЫХ
МЕХАНИЗМОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ 75

Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Volodko A. S., Okovity V. V.,
Litvinko A. A., Astashinsky
HIGH-ENERGY LASER TREATMENT OF PLASMA COATINGS FROM
MATERIALS BASED ON OXIDE CERAMICS 83

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Astashinsky V. M.	83
Devoino O. G.	83
Litvinko A. A.	83
Okovity V. A.	83
Okovity V. V.	83
Panteleenko F. I.	83
Volodko A. S.	83
Бутенко В. И.	3
Васильева М. А.	9
Волчихина А. А.	9
Гончарова Н. А.	75
Горобец И. А.	15
Грубка Р. М.	21
Гуляев Н. А.	29
Гусев Г. А.	29
Долматова М. В.	21
Задаянчук Н. А.	75
Колганова Е. Н.	34
Корольков Ю. В.	3
Котляров Б.С.	46
Котляров В.Б.	46
Котляров С.Б.	46
Лебедев В. А.	34
Леушин И. О.	29
Мартюшова А. А.	41
Мельникова Е. П.	34
Михайлов А.Н.	46
Овчинников Е.В.	57
Поляков П.А.	75
Сазоненко Ю. В.	21
Шишкарев М.П.	68
Шишкина А. П.	34
Яицков И. А.	75
Яровая Е. И.	29

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, заключение

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, максимумом 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 60x60 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 сверху 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: +38 062 301-08-40.

E-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: +38 (062) 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 SYNTHESSES 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 // Научно-технический 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 (78)' 2022

Главный редактор

д-р техн. наук, проф. А. Н. Михайлов

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Технический редактор Л. Б. Ступакова

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ»,
+38 (062) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. +38 (071) 306-08-79,
+38 (062) 301-08-05.

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

Сборник (Е) зарегистрирован в Министерстве информации Донецкой Народной Республики.