

Вып. 2(69)'2020 **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

**ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 2 (69)' 2020



ДОНЕЦК - 2020

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 2 (69)' 2020

Донецк – 2020

УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 1 от 28 февраля 2020 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), Курбанов Х.К. (Туркменистан), Ищенко А.Л., 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), Сидорова Е.В. (ДНР), Суслов А.Г. (Россия), Тока О. (Молдова), Федонин О.Н. (Россия), Хандожко А.В. (Россия), Чернышев Е.А. (ДНР), Шабает О.Е. (ДНР)

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра ТМ. Тел.: +38 062 301-08-40,

E-mail: tm@fimm.donntu.org, Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

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, 2020
© ГОУВПО «ДОННТУ», 2020

А. К. Воробьёв, аспирант, **Е. А. Зуев**, аспирант
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва; ООО «Надёжность ТМ», г. Москва.
Тел./Факс: +7 (999) 9875731; E-mail: VorobyevAK93@gmail.com, ZuevEuA@gmail.com

ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЙ ГЛАВНЫХ ЦИЛИНДРОВ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ДЛЯ ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

В статье описаны причины возникновения и развития трещин в галтелях днищ гидроцилиндров мощных гидравлических прессов. Приведены результаты расчета напряженно деформированного состояния в программе для конечно элементного анализа. Проведена теоретическая оценка снижения напряжений в области галтели, по средству создания поднутрения, с целью получения более плавного перехода, между стенками и днищем. Выдвинуто предположение об обнаружении нового, влияющего на зарождение трещин, фактора, связанного с гидроударом в момент напыления цилиндра.

Ключевые слова: гидравлический цилиндр, галтель днища, усталостное разрушение, зарождение трещин, напряженно-деформированное состояние.

A.K. Vorobyev, E.A. Zuev

REASONS FOR DESTRUCTION OF HYDRAULIC PRESS CYLINDERS AND TECHNICAL DECISIONS TAKEN TO RESOLVE THIS PROBLEM

The article describes the causes of the occurrence and development of cracks in the fillet bottoms of the hydraulic cylinders of powerful hydraulic presses. The results of calculating the stress-strain state in a program for finite element analysis are presented. A theoretical assessment of the reduction of stresses in the fillet region was carried out, by means of creating an undercut, in order to obtain a smoother transition between the walls and the bottom. An assumption has been put forward that a new factor affecting the initiation of cracks is discovered that is associated with water hammer at the time of spraying of the cylinder.

Keywords: hydraulic cylinder, bottom fillet, fatigue failure, crack nucleation, stress-strain state.

1. Введение.

Текущий опыт эксплуатации показывает, что наибольшее число отказов мощных гидравлических прессов с наиболее тяжелыми последствиями связано с разрушениями и повреждениями базовых деталей. С увеличением времени эксплуатации число отказов увеличивается, поэтому для осуществления возрастающих производственных требований необходимо существенно увеличить прочность базовых деталей. В настоящей статье будут рассмотрены причины разрушения главных цилиндров гидравлических прессов, а также некоторые способы для их предотвращения.

2. Характерные случаи разрушений главных цилиндров.

Появление и рост усталостных трещин в галтелях днищ цилиндров является одной из основных причин отказов и разрушения крупных цилиндров мощных гидравлических прессов при воздействии циклической нагрузки. Практика обслуживания и обследования формовочных прессов показала, что цилиндры, изготовленные из стали 35, разрушаются по трещинам в галтели днища так же, как цилиндры, изготовленные из стали 25 ГС, приведенные на рисунке 1. Более подробно, эта тема освещена в публикации материалов конференции «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» [1].

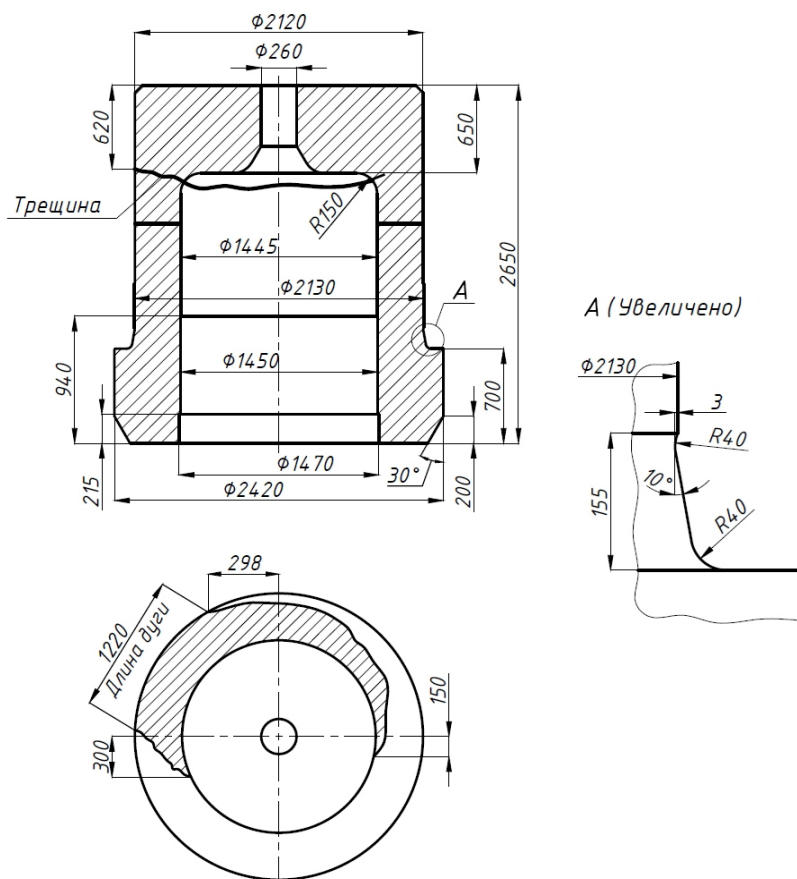


Рисунок 1 Схемы разрушения цилиндра силой 50 МН по трещине в галтели дна

Конструкционная качественная углеродистая сталь 35 используется для изготовления продукции невысокой прочности, работающей с небольшими напряжениями – цилиндры, колонны прессов, оси, коленчатые валы, тяги, траверсы, другие детали. Сталь 35 имеет предел текучести $\sigma_T=315$ МПа.

Сталь 25 ГС конструкционная низколегированная используется для сварных конструкций. Предел текучести $\sigma_T=275$ МПа. Свойства стали 25ГС зависят от вида термообработки, температуры отпуска и сечения. Важным отличием стали 25ГС от стали 35 является хорошая свариваемость. Сварку можно проводить без предварительного нагревания, любыми методами, без термообработки швов. Таким образом, применение стали 25 ГС является экономически более целесообразным.

Отдельно следует отметить, что обследование ряда прессов после ремонта, в ходе которого трещины в гидроцилиндрах устраняются сваркой и сварочный материал имеет предел текучести 450 МПа, наблюдается разрушение гидроцилиндров в области галтели непосредственно по сварному шву.

Для определения причин разрушения цилиндров проведен их расчет МКЭ [1]. Напряженное состояние главных цилиндров формовочных прессов силой 35 МН и 50 МН представлено на рис. 2, максимальные главные напряжения σ_{1v} в галтелях дна цилиндров равны, соответственно 140,1 МПа и 130,5 МПа.

В гидроцилиндрах, произведённых из разных сталей, усталостные трещины всегда появляются в одной и той же зоне, с равной величиной максимальных эквивалентных напряжений. Это значит, что причину появления трещин усталости и

разрушения днищ цилиндров определяет материал, а вероятно, технология изготовления днищ, которая была одинаковой для различных марок стали.

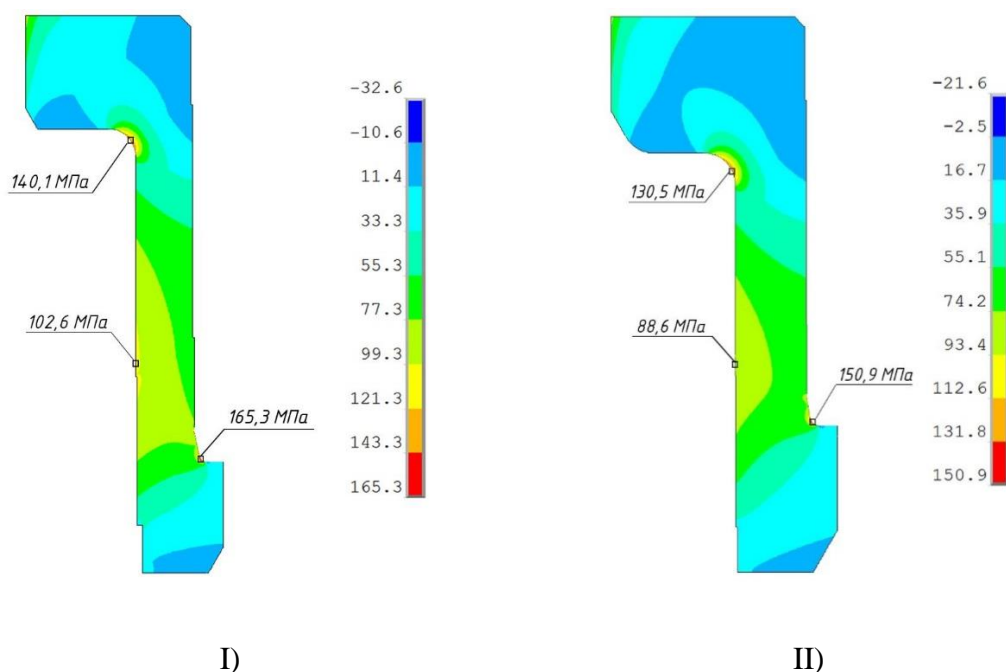


Рисунок 2. Напряженное состояние цилиндров усилием 35 МН и 50 МН, изготовленных из стали 35: I – гидроцилиндр усилием 35 МН; II – гидроцилиндр усилием 50 МН

Отчёт о влиянии причин разрушения днищ цилиндров с принятой технологией проковки заготовок доказывают результаты проведённых усталостных испытаний. Вес заготовки слитка около 79 тонн в полтора раза больше веса слитка днища, равного 57 тоннам, значит при одних и тех же условияхковки интенсивность проработки и предел выносливости материала днища должны быть больше, чем материала обечайки. Но предел выносливости днища в зоне галтели составляет $\sigma_{0\text{дн}} \leq 130\text{МПа}$, а обечайки $\sigma_{0\text{рад}} = 235\text{-}250\text{МПа}$.

Предложенная, более интенсивная технология проковки заготовки днища цилиндра, существенно увеличивает предел выносливости галтельной зоны. Однако, максимальные напряжения в галтели будут выше, чем максимальные напряжения на внутреннем контуре обечайки. Так для гидроцилиндра усилием 35МН и 50МН максимальные эквивалентные напряжения на контуре галтели днища в полтора раза больше, чем аналогичные напряжения на внутреннем контуре обечайки (рисунок 2). Это, в общем случае, сильно снижает запас прочности цилиндра по усталости и при коррозионном воздействии рабочей жидкости, или за счет случайных повреждений поверхности галтели, приводит к возникновению трещин усталости и разрушению цилиндра.

Значительное снижение максимальных напряжений в галтели достигается её заглублением в днище гидроцилиндра с увеличением радиуса галтели [3]. Максимальные напряжения в галтели уменьшаются в 1.4 раза, со 140.1 до 103.4 МПа для гидроцилиндра усилием 35 МН и со 130.5 МПа до 95.2 МПа для гидроцилиндра усилием 50МН (рисунок 3). Эти значения максимальных напряжений практически совпадают с напряжениями, действующими на внутреннем контуре обечайки, и обеспечивают неограниченную долговечность внутренней поверхности цилиндра даже при

использовании воды в качестве рабочей жидкости [4]. Однако перевод на другую рабочую жидкость, может отрицательно сказаться на других узлах работы гидравлического оборудования.

Гидроцилиндры, днища которых произведены с применением приведенных выше предложенных конструктивно–технологических решений, функционируют в гидравлических прессах на линии производства железнодорожных колес на Выксунском Metallургическом Заводе с 2005 года. Эта линия выпускает порядка 820 тысяч железнодорожных колес в год, что является мировым рекордом производительности для мощных гидравлических прессов. За пятнадцать лет эксплуатации, возникновения трещин в галтелях днищ цилиндров не зафиксировано.

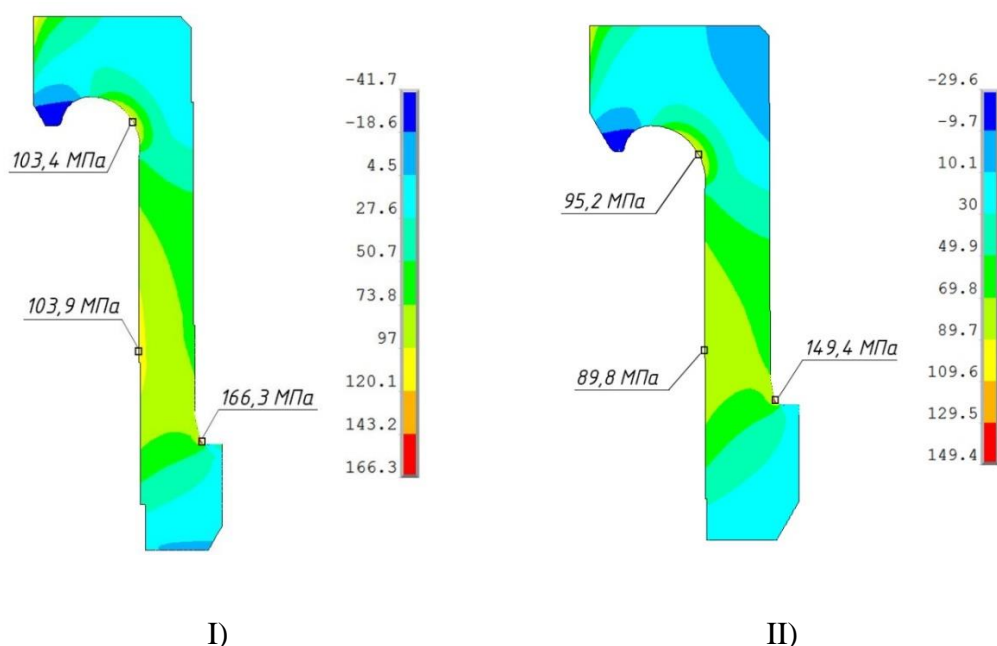


Рисунок 3 Напряженное состояние внутренней поверхности гидроцилиндров усилием 35МН и 50МН при предложенной конструкции галтелей днища:

I – гидроцилиндр усилием 35МН; II – гидроцилиндр усилием 50МН

3. Теоретическая оценка влияния динамического давления жидкости.

Еще одним фактором, влияющим на появление и развитие трещин в галтелях, является не равномерное распределение давления при заполнении гидроцилиндра. При подаче давления, в рабочем объеме цилиндра происходит гидроудар, в результате которого давление на стенках возле поверхности плунжера, оказывается выше, чем давление в галтели днища, особенно в случаях, когда траверса находится в нижнем положении (лежит на заготовке) и между днищем и плунжером расстояние больше внутреннего диаметра цилиндра, что подтверждается моделированием (рис. 4).

Из сосуда высокого давления в цилиндр с атмосферным давлением подается несжимаемая жидкость (вода) с максимальным давлением равным 320 МПа. В момент открытия клапана наполнения, расход на входе в цилиндр, достигает 400 литров в секунду.

Постановка задачи по моделированию распределения потока воды в рабочей области, а также алгоритм проведения исследования в среде «SOLIDWORKS Flow Simulation» включают в себя определение граничных условий на входе в гидроцилиндр,

задание свойств жидкости, начальной скорости и температуры [5]. Выбирается нестационарный тип задачи, а в качестве цели исследования, при которой программа завершает расчет, задается установившееся среднее давление на стенках и днище цилиндра.

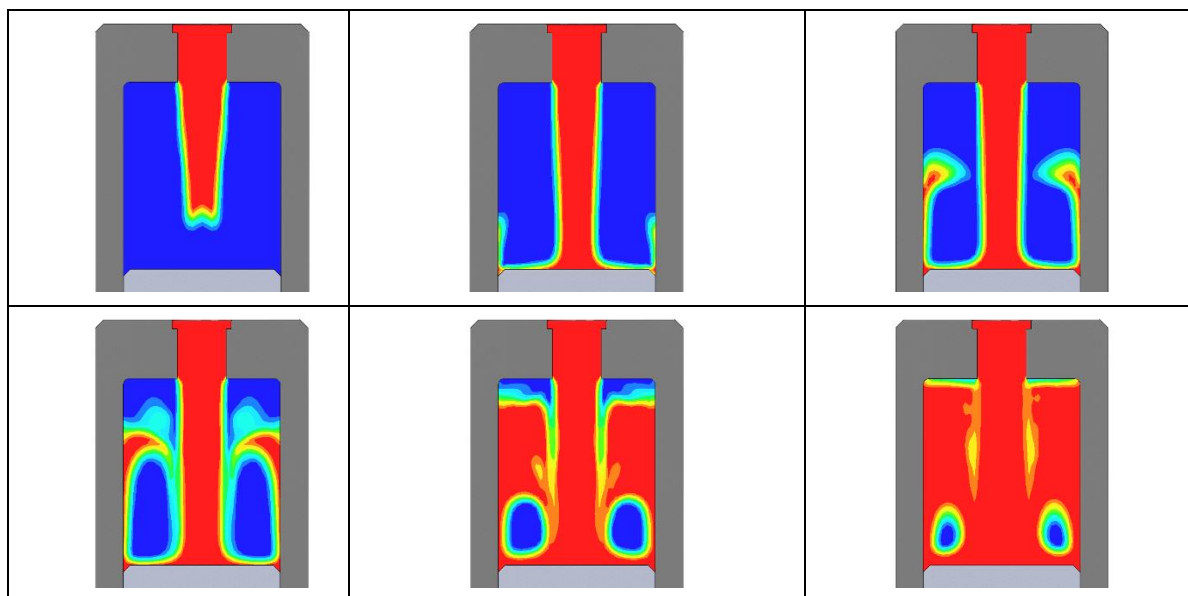


Рисунок 4. Динамическое давление жидкости при наполнении, МПа

На рисунке 4 показано распределение динамического давления в зависимости от времени, из которого видно, что давление имеет иной характер распределения, который влияет на напряженно-деформированное состояние, стенок и днища цилиндра.

Возникает вопрос, насколько влияет кратковременное распределение давления на значение напряжений в галтели. Для ответа на этот вопрос, предлагается провести замеры напряженно-деформированного состояния стенок цилиндра по всей длине, при помощи электротензометрического исследования [6]. Анализ состояния конструкции и прогнозирование количества циклов до отказа, на основании электротензометрии, можно провести на основе докторской диссертации Суркова А.И. [7].

Для проведения исследования напряженно-деформированного состояния на действующем оборудовании, необходимо определить точки установки датчиков, где анализ методом конечных элементов показывает характерное изменение НДС, а так же расположение таких мест позволяет без проблем для производства, смонтировать исследовательское оборудование и проводить замеры в течении нескольких полных циклов штамповки заготовок.

4. Заключение

Максимальные эквивалентные напряжения, определяющие технологическую функцию гидроцилиндров, обычно не более 130 МПа. Такой уровень напряжений может обеспечивать практически неограниченную долговечность цилиндров и работу всей гидравлической системы в целом, при соблюдении общих рекомендаций к работе на производстве. Разрушения гидравлических цилиндров, случившиеся вследствие развития трещин усталости в галтели днища, обусловлены конструктивно-технологическими ошибками, допущенными при создании или даже при проектировании цилиндров. Однако, не менее значительное влияние на распределение давления в момент за-

полнения гидроцилиндра рабочей жидкостью, может оказывать гидроудар. Таким образом характер нагружения цилиндра имеет более сложный вид распределения давления, чем в установившемся режиме. Такие кратковременные скачки напряжений, могут вызвать зарождение или срагивание трещин.

Поэтому, при проведении плановых ремонтов, рекомендуется контролировать гидроцилиндры методами неразрушающего контроля. Что позволит значительно уменьшить риск аварийной остановки оборудования и избежать значительных финансовых затрат. Технология обследования подобных гидроцилиндров методом УК более подробно изложена в статье [8].

Методы обследования, расчёта и прогнозирования надёжности машиностроительного оборудования, упомянутые в этой статье, внедрены и используются в компании «Надёжность Тяжёлых Машин», специализирующейся на экспертизе, ремонте и контролю механических и гидравлических прессов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Воробьёв, А. К. Характерные случаи разрушений главных цилиндров, причины разрушений и технические решения, принятые для их предупреждения / А.К. Воробьёв, А.М. Грибков, И.А. Зюбин // XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропнеумоагрегаты» (Москва, 4 декабря 2019 г.). Материалы конференции – М.: Мир науки, 2019. – С. 114-118.

2. Волков, А. Ю. Выбор метода расчёта напряженно-деформированного состояния гидравлических прессов / А. Ю. Волков, А. К. Воробьёв, Е. А. Зуев // Научный журнал. – 2018. – № 9 (32). – 30-33 с.

3. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Г. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1977. – 230 с.

4. Кубачек, В. В. Совершенствование технологии изготовления гидроцилиндров прессов для колесопрокатных цехов. Гидропрессовое оборудование, выпускаемое «ПО «УКРАЛМАШ» и проблемы его создания / В. В. Кубачек, Р. С. Фазильяхметов, Н. Н. Александрова, П. П. Карпов. – Свердловск. – 1988. – С. 52 - 59.

5. Соловьева, А. А. Моделирование распределения водного потока в программном комплексе «SOLIDWORKS Flow Simulation», Материалы I международной научно-практической конференции «Научный потенциал молодежи и технический прогресс» 2018. – С. 21 – 23.

6. Зуев, Е. А. Определение напряженно-деформированного состояния колонн гидравлических прессов методом электротензометрии / Е. А. Зуев, М. Н. Зуева // Справочник. Инженерный журнал. – Издательский дом «Спектр», 2019. – №08(269) август 2019. – С. 27 - 30.

7. Сурков, А. И. Разработка теории прогнозирования и конструктивное обеспечение надёжности базовых деталей уникальных гидравлических штамповочных прессов: дис. ... докт. техн. наук. / А. И. Сурков. – Москва: Библиотека МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1985. – 420 с.

8. Капускин, Ю. И. Контроль методом ультразвуковой дефектоскопии рабочих цилиндров мощных гидравлических прессов / Ю.И. Капускин, А. П. Моисеев, И. А. Сурков, И.В. Тимохин // В мире НК. – 2009. – № 3. – С. 22-24.

Поступила в редколлегию 31.01.2020 г.

УДК 622.21

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

Донецкий национальный технический университет, ДНР

E-mail: gorobets.ascon@gmail.com

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ БСП НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГОРНОГО КОМБАЙНА

Обоснована зависимость производительности очистного комбайна от параметров зацепления зубьев колесно-реечного движителя БСП. Разработанный подход определения повышения производительности очистного комбайна позволяет установить и оценить степень влияния параметров зубчатого зацепления колесно-реечного движителя на производительность очистного комбайна с БСП. Доказано, что при использовании колесно-реечного движителя БСП с оптимальным профилем зубьев открытой передачи, позволяет повысить производительность очистного комбайна до 20%.

Ключевые слова: производительность, параметр, зацепление, движитель, комбайн, влияние, оптимизация

I. Gorobets

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF CHS MOVER PARAMETERS ON MINING SHEARER PRODUCTIVITY

The dependence of the productivity of the shearer on the gearing parameters of the wheel-rack mover CHS is justified. The developed approach for determining the efficiency of the shearer allows to establish and evaluate the degree of influence of the gear parameters of the wheel-rack mover on the performance of the shearer with CHS. It is proved that when using a wheel-rack mover CHS with an optimal tooth profile of an open transmission, it allows to increase the productivity of the shearer up to 20%.

Keywords: productivity, parameter, gearing, mover, shearer, influence, optimization

1. Введение

В настоящее время современные очистные комбайны оснащаются бесцепными системами перемещения (БСП) колесно-реечного типа, обладающие повышенной безопасностью.



Рисунок 1. Вид очистного комбайна с БСП



Рисунок 2. Схема конструкции движителя БСП

Особенностями конструкции и эксплуатации движителей БСП, по исследованиям автора, являются:

- небольшое число зубьев приводного колеса (8...15), значительная высота зубьев и малая (по сравнению с высотой) ширина зубчатого венца приводного колеса;
- наличие изменений межцентрового расстояния приводного колеса и рейки, достигающего 10% номинальной его величины;
- погрешность изготовления элементов зацепления (зубьев, цевок), их взаимного пространственного положения из-за сложности изготовления длинных штампованных, литых, сборно-сварных зубчатых (цевочных) реек и экономической нецелесообразности изготовления их максимально точными. При этом погрешность шага зубьев рейки достигает 3% номинального его значения;
- неравномерность скорости перемещения, обусловленная геометрией зацепления. При этом коэффициент неравномерности скорости перемещения достигает величины 1,10;
- неравномерность тягового усилия, обусловленная геометрией и изменениями условий зацепления. При этом коэффициент неравномерности тягового усилия достигает величины 1,54;
- высокая динамическая нагруженность элементов конструкции очистного комбайна из-за неравномерности тягового усилия и скорости перемещения;
- знакопеременное радиальное усилие в зацеплении, стучающее мгновенное значение КПД движителя (с 0,93 до 0,30) из-за несовершенства геометрии профиля зубьев и изменений условий работы движителя;
- значительный износ зубьев, снижающий долговечность приводных элементов движителя.

Однако особенности эксплуатации комбайнов с БСП, технологические погрешности изготовления элементов реек и геометрия профиля зубьев движителя обуславливают неравномерности тягового усилия и скорости перемещения комбайна, невысокий КПД движителя.

Целью исследований является оценка влияния параметров зацепления открытой зубчатой передачи движителя БСП на производительность очистного комбайна.

2. Основное содержание и результаты

Оценку зависимости производительности очистного комбайна от параметров зацепления колесно-реечной передачи БСП произведем на основании следующих положений.

Поскольку минутная производительность комбайна пропорциональна скорости его перемещения, то справедливо

$$\frac{Q_2}{Q_1} \equiv \frac{V_{k2}}{V_{k1}}, \quad (1)$$

где Q_2 и Q_1 - производительность, а V_{k2} и V_{k1} - скорость перемещения комбайна с различными характеристиками зацепления приводных элементов БСП.

Составим уравнение баланса мощности комбайна

$$(N_p + N_{II})\eta_{MP}^{-1} + N_{МП}(\eta_q\eta_{МП})^{-1} \leq M_y\omega_{об}, \quad (2)$$

где N_p ; N_{II} ; $N_{МП}$ - мощность, соответствующая разрушению пласта, погрузке разрушенного угля на конвейер, перемещению комбайна; M_y - устойчивый момент двигателя; $\omega_{об}$

- угловая частота вращения ротора двигателя; η_q ; η_{MP} ; $\eta_{МП}$ - КПД соответственно двигателя БСП, механического привода исполнительного органа и механизма перемещения.

Зависимости мощности разрушения и погрузки пласта полезного ископаемого определим, как:

$$N_p = F_p V_p, \tag{3}$$

$$N_{\Pi} = F_{\Pi} V_{\Pi}, \tag{4}$$

где F_p и F_{Π} - усилия разрушения пласта и погрузки угля на конвейер, соответственно; V_p - скорость резания.

Поскольку усилия разрушения пласта и погрузки угля на конвейер пропорциональны толщине среза, а значит, и скорости перемещения комбайна, получим:

$$F_p = F_{0p} + a_p V_k; \tag{5}$$

$$F_{\Pi} = F_{0\Pi} + a_{\Pi} V_k, \tag{6}$$

где F_{0p} и $F_{0\Pi}$ - начальная величина усилий разрушения пласта и погрузки разрушенного пласта, соответственно; V_k - скорость перемещения комбайна; a_p ; a_{Π} – величины, учитывающие свойства угольного пласта, параметры режущего инструмента, режимы работы и схему набора режущего инструмента на исполнительном органе комбайна.

Представим устойчивый крутящий момент на валу электродвигателя очистного комбайна, как [1]

$$M_y = \frac{M_{\phi \max} k_y}{k_{BЧ} (1 + k_B k_{BЧ})}, \tag{7}$$

где $M_{\phi \max}$ - максимальный момент, который может развивать электродвигатель в реальной шахтной сети; $k_{HЧ}$ и $k_{BЧ}$ - коэффициент неравномерности, соответственно, низко- и высокочастотной составляющей момента; k_B - коэффициент, учитывающий качество управления комбайном.

После подстановки (3)...(7) в (2) и решения последнего относительно V_k , получим

$$V_k = \frac{b k_{HЧ}^{-1} - c}{F \eta_q^{-1} + a}, \tag{8}$$

где $a = (a_p + a_{\Pi}) V_p \eta_{МП} \eta_{MP}^{-1};$ \tag{9}

$$b = \frac{(M_{\phi \max} k_y \eta_{МП} \omega_{\partial \epsilon})}{(1 + k_B k_{BЧ})}, \tag{10}$$

$$c = V_p (F_{0p} + F_{0\Pi}) \eta_{МП} \eta_{MP}^{-1}.$$

Тогда выражение (1) будет иметь вид:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{bk_{HЧ2}^{-1} - c}{bk_{HЧ1}^{-1} - c} \cdot \frac{F_1\eta_{q1}^{-1} + a}{F_2\eta_{q2}^{-1} + a}. \quad (11)$$

Представим $k_{HЧ}$ в виде [1]

$$k_{HЧ} = \frac{M_{c\max}}{M_{cc}} = \frac{\overline{M}_c^p + M_a^p + \overline{M}_c^\Pi + M_a^\Pi \cos\theta_{P\Pi} + \overline{M}_c^{M\Pi} + M_a^{M\Pi} \cos\theta_{P\Pi\Pi}}{\overline{M}_c^p + \overline{M}_c^\Pi + \overline{M}_c^{M\Pi}} \equiv \equiv 1 + \frac{M_a^p + M_a^\Pi \cos\theta_{P\Pi} + M_a^{M\Pi} \cos\theta_{P\Pi\Pi}}{\overline{M}_c^p + \overline{M}_c^\Pi + \overline{M}_c^{M\Pi}}, \quad (12)$$

где \overline{M}_{cc} , $M_{c\max}$ - среднее значение и максимальная величина момента сил сопротивления; $\overline{M}_c^p; M_a^p; \overline{M}_c^\Pi; M_a^\Pi; \overline{M}_c^{M\Pi}; M_a^{M\Pi}$ - среднее значение (\overline{M}_c) и амплитуда (M_a) моментов сил сопротивления соответственно разрушения пласта, погрузки разрушенного угля на конвейер и перемещения комбайна; $\theta_{P\Pi}$; $\theta_{P\Pi\Pi}$ - фаза между амплитудами моментов сил сопротивления, соответственно разрушения пласта и погрузки угля на конвейер; разрушения пласта и перемещения комбайна.

Почленно поделив второе слагаемое (12) и представив

$$\frac{M_a \cos\theta}{\overline{M}_{cc}} = \frac{\overline{M}_c}{\overline{M}_{cc}} \cdot \frac{M_a + \overline{M}_c - \overline{M}_{cc}}{\overline{M}_c} \cos\theta, \quad (13)$$

а также обозначив

$$(M_a + \overline{M}_c) / \overline{M}_c = k_{HЧ}; \quad (14)$$

$$\overline{M}_c / \overline{M}_{cc} = \delta, \quad (15)$$

получим

$$k_{HЧ} = 1 + \delta_p (k_{HЧ}^p - 1) + \delta_\Pi (k_{HЧ}^\Pi - 1) \cos\theta_{P\Pi} + \delta_{M\Pi} (k_{HЧ}^{M\Pi} - 1) \cos\theta_{P\Pi\Pi}, \quad (16)$$

где δ_p ; δ_Π ; $\delta_{M\Pi}$; - весомость нагрузки, соответственно от разрушения пласта, погрузки разрушенного угля на конвейер и перемещение комбайна в общей нагрузке; $k_{HЧ}^p; k_{HЧ}^\Pi; k_{HЧ}^{M\Pi}$ - коэффициенты неравномерности соответствующего вида нагрузок по низкой частоте.

Представим момент сил сопротивления от разрушения пласта в виде [2,3,4], получим

$$k_{HЧ}^\Pi = \frac{M_{c\max}^\Pi}{\overline{M}_c^p} = \frac{0,5D_u \left[Z_\Pi \sum_1^{n_p} \sin \gamma_i + y_0 n_p f_p + f_p (q_1 h_{\max} + q_2 V_k) \sum_1^{n_p} \sin \gamma_i \right]^{\max}}{0,5D_u \left[Z_\Pi \sum_1^{n_p} \sin \gamma_i + y_0 n_p f_p + f_p (q_1 h_{\max} + q_2 V_k) \sum_1^{n_p} \sin \gamma_i \right]^{cp}}, \quad (17)$$

где D_u - диаметр исполнительного органа по резцам; Z_{II} - математическое ожидание усилия на передней грани резца при максимальной толщине среза; y_0 - усилие по задней грани острого резца; n_p - число резцов, контактирующих с забоем; f_p - коэффициент трения резца о разрушаемый материал; h_{max} - максимальная толщина среза; q_1 и q_2 - коэффициенты, учитывающие влияние толщины среза и действительной скорости перемещения комбайна на усилия по задней грани резца; γ_i - угол, определяющий положение i -го резца на дуге резания.

Однако, согласно [2]

$$\sum_1^{n_p} \cos \gamma_i = A_p + B_p \sin \lambda_p t, \quad (18)$$

где A_p - среднее значение; B_p - амплитуда; λ_p - частота изменения суммы синусов.

Тогда

$$\left[\sum_1^{n_p} \sin \gamma_i \right]_{\lambda_{pt}=\pi/2}^{\max} = A_p + B_p, \quad (19)$$

$$\left[\sum_1^{n_p} \sin \gamma_i \right]_{\lambda_{pt}=2\pi}^{cp} = A_p, \quad (20)$$

Тогда зависимость (18) преобразуем к виду

$$k_{HЧ} = \frac{D + EV_{k \max}}{u + H\bar{V}_k}, \quad (21)$$

где

$$D = Z_{II}(A_p + B_p) + y_0 n_p f_p + f_p q_1 h_{\max} (A_p + B_p), \quad (22)$$

$$E = f_p q_2 (A_p + B_p), \quad (23)$$

$$u = Z_{II} A_p + y_0 n_p f_p + f_p q_1 h_{\max} A_p, \quad (24)$$

$$H = f_p q_2 A_p. \quad (25)$$

Для интенсивных режимов работы очистного комбайна ($V_k \geq 3$ м/мин)

$$\frac{D}{(u + H\bar{V}_k)} \approx 1. \quad (26)$$

Представим

$$\frac{EV_{k \max}}{u + H\bar{V}_k} = \frac{EV_{k \max}}{EV_k} \cdot \frac{EV_k}{u + H\bar{V}_k}. \quad (27)$$

Обозначим

$$E\bar{V}_k / (u + H\bar{V}_k) = \delta_V, \quad (28)$$

$$V_{k \max} / \bar{V}_k = k_{HЧ}^V, \quad (29)$$

Тогда

$$k_{HЧ}^P = 1 + \delta_V k_{HЧ}^V. \quad (30)$$

Для указанных режимов работы очистных комбайнов для тонких пластов, например, $\delta_V=0,08\dots 0,10$. Будем считать, что неравномерность момента сил сопротивления, а следовательно, и не зависит от места положения движителя БСП и профиля его зубьев и остаются постоянными, т. е.

$$k_{HЧ2}^П = k_{HЧ1}^П = const. \quad (31)$$

Коэффициент неравномерности момента сил сопротивления по низкой частоте, обусловленный неравномерностью тягового усилия, для одинаковых габаритных размеров движителя БСП определяется выражением

$$k_{HЧ}^{МП} = \frac{M_c^{МП}}{\bar{M}_c^{МП}} \equiv \frac{F_{\max}}{\bar{F}} = k_{HЧ}^F, \quad (32)$$

где \bar{F} и F_{\max} - средняя и максимальная величины тягового усилия, реализуемого движителем БСП.

Тогда выражение (16) с учетом зависимостей (30) – (32) и при $\theta_{рП} = \theta_{рМП} = 0$ принимает вид

$$k_{HЧ} = 1 + \delta_p \delta_V k_{HЧ}^V + \delta_{П} (k_{HЧ}^П - 1) + \delta_{МП} (k_{HЧ}^F - 1). \quad (33)$$

Весомость нагрузки от нагрузки разрушаемого угля $\delta_{П}$ и перемещения комбайна $\delta_{МП}$ по данным исследований [5] при интенсивных их режимах работы (у комбайнов для выемки тонких пологих пластов) может быть принята: $\delta_{П} = 0,25\dots 0,35$; $\delta_{МП} = 0,10\dots 0,15$. Тогда δ_p будет в пределах $0,5\dots 0,65$.

Представим зависимость (12) в виде

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{(b - k_{HЧ2}c)k_{HЧ1}}{(b - k_{HЧ1}c)k_{HЧ2}} \cdot \frac{(F_1 + a\eta_{\delta1})\eta_{\delta2}}{(F_2 + a\eta_{\delta2})\eta_{\delta1}}. \quad (34)$$

Поскольку можно принять $b \gg k_{HЧ}c$ и $F \gg a\eta_{\delta}$ (особенно у комбайнов для выемки тонких пологих пластов), тогда

$$\frac{Q_2}{Q_1} \approx \frac{k_{HЧ1}F_1\eta_{\delta2}}{k_{HЧ2}F_2\eta_{\delta1}}. \quad (35)$$

Обозначим

$$k_{HЧ2}/k_{HЧ1} = \chi_p, \quad (36)$$

$$F_2/F_1 = \chi_F, \quad (37)$$

$$\eta_{\delta2}/\eta_{\delta1} = \chi_{\eta}. \quad (38)$$

Тогда

$$\frac{Q_2}{Q_1} \approx \frac{\chi_{\eta}}{\chi_p \chi_F}, \quad (39)$$

где χ_p ; χ_F ; χ_η - величины, характеризующие снижение соответственно тягового усилия и повышение КПД двигателя БСП.

Тогда, например, при использовании двигателя колесно-реечной передачи БСП с оптимальным профилем зубьев, за счет чего на 60% снижается неравномерность тягового усилия, на 50% - снижается неравномерность скорости перемещения комбайна; на 15% повышается средний КПД двигателя и на 3-20% снижается величина тягового усилия [7] за счет рационального места положения двигателя, прирост производительности составляет - 20%.

3. Заключение

Обоснована зависимость производительности очистного комбайна от параметров зацепления зубьев колесно-реечного двигателя БСП. Разработанный подход определения повышения производительности очистного комбайна позволяет установить и оценить степень влияния параметров зубчатого зацепления колесно-реечного двигателя на производительность очистного комбайна с БСП. Доказано, что при использовании колесно-реечного двигателя БСП с оптимальным профилем зубьев открытой передачи, позволяет повысить производительность очистного комбайна до 20%.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов: Учебник для вузов / Г. В. Малеев, В. Г. Гуляев, Н. Г. Бойко и др. – М.: Недра, 1988. – 368 с.
2. Бойко, Н. Г. Очистные комбайны для тонких пластов / Бойко Н. Г. – Донецк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – 476 с.
3. Шабаев, О. Е. Оценка влияния ширины захвата шнекового исполнительного органа очистного комбайна для тонких пологих пластов на энергетические параметры машины / О. Е. Шабаев, Е. Ю. Степаненко, П. П. Зинченко // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 22-25 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т. 3. – С. 47 – 50.
4. Нечпаев, В. Г. Имитационная модель функционирования шнековых очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологих пластов / В. Г. Нечпаев, О. Е. Шабаев, Е. Ю. Степаненко, П. П. Зинченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. № 2(65). – С. 26-34.
5. Исследование погрузочной способности барабанного исполнительного органа и мощности выгрузки угля: Отчет по НИР (промежуточный) / ДПИ, руков. Н. Г. Бойко, В. А. Межаков – № ГР 01826048241; инв. № 02850019309 – Донецк, 1984. – 114 с.
6. 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.
7. Горобец, И. А. Оптимизация профиля зубьев двигателей механизма перемещения очистных комбайнов. / И. А. Горобец // Известия Вузов. Горный журнал. – М., 1992. – Вып. №5. – С. 77-81.

Поступила в редколлегию 10.02.2020 г

УДК 621.9: 658.5

Т. Г. Ивченко, канд. техн. наук, доцент, **А. А. Андреева**, **М. А. Епишева**
Донецкий национальный технический университет
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОНКОМ ТОЧЕНИИ РЕЗЦАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлены результаты расчета тепловых потоков и температур в зоне резания при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов. Установлены общие закономерности изменения тепловых потоков в зависимости от режимов резания для тонкого точения закаленных сталей и чугунов резцами из сверхтвердых материалов. Определены основные закономерности распределения температур на передней и задней поверхностях лезвия инструмента из сверхтвердых материалов. Выполнен сравнительный анализ температур резания при тонком точении различных закаленных сталей и чугунов резцами из различных сверхтвердых материалов.

Ключевые слова: сверхтвердые материалы, тонкое точение, тепловой поток, температура резания

T. G. Ivchenko, A. A. Andreeva, M. A. Episheva

ANALYSIS OF THE THERMAL STREAMS AND TEMPERATURES IN THE CUTTING AREA AT FINISH TURNING BY THE TOOLS FROM SUPER HARD MATERIALS

The results of calculation of the thermal stream and temperatures in the cutting area at the finish turning by cutting tools from super hard materials are expected. General conformities to the law of thermal stream change depending on the cutting regimes for finish turning of hard-tempered steel and cast irons by chisels from the super hard materials are set. Basic conformities to the law of the temperatures distributing on the front and back surfaces of the cutting tools from the super hard materials are certain. The comparative analysis of the cutting temperatures at the finish turning of the different hard-tempered steel and cast-irons by the chisels from the different super hard materials is executed.

Keywords: super hard materials, finish turning, thermal stream, cutting temperature.

1. Введение

Современное инструментальное производство располагает широкой гаммой сверхтвердых инструментальных материалов (СТМ), обеспечивающих возможность существенного повышения производительности при окончательной обработке деталей машин. Наибольшее распространение при обработке сталей и чугунов имеют СТМ на основе кубического нитрида бора, так как, обладая высокой твердостью, они химически инертны к черным металлам [1].

Основное ограничение роста режимов резания при использовании СТМ – высокие температуры в зоне резания, исследование которых весьма актуально для повышения эффективности механической обработки [2].

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные исследования теплового состояния режущего инструмента, оснащенного СТМ, не охватывают всего существующих их многообразия [3]. В связи с чем, существенно возрастает роль теоретических методов анализа тепловых потоков и температур в зоне резания инструментами из СТМ, успешно используемых применительно к твердосплавным инструментам [4].

Известная методика аналитического расчета трехмерных температурных полей в лезвии режущего инструмента, учитывающая одновременное действие источников

теплоты на передней и задней поверхностях, апробирована и экспериментально подтверждена для твердосплавного инструмента [5].

Для разнообразных условий эксплуатации этого же инструмента достаточно хорошо теоретически исследованы и закономерности формирования тепловых потоков в зоне резания [6]. Интерес представляет дальнейшее развитие методики исследования теплового состояния зоны резания для инструментов, оснащенных СТМ.

Целью работы является исследование тепловых потоков и температур в зоне резания для различных условий тонкого точения резцами, оснащенными СТМ.

2. Основное содержание и результаты работы

При резании на лезвие режущего инструмента одновременно действуют источники теплоты на передней и задней поверхностях, возникающие вследствие взаимодействия со стружкой и деталью (рис. 1).

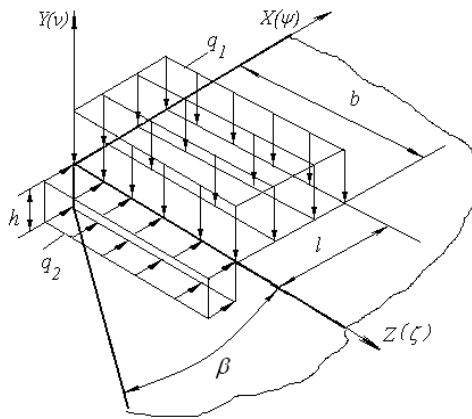


Рисунок 1. К определению тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия инструмента

При исследовании теплового состояния зоны резания, прежде всего, определяются тепловые потоки на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента. Ось Z в рассматриваемой системе координат ориентируется в направлении главной режущей кромки; размеры источника: b – ширина среза; l – длина контактной площадки в направлении схода стружки; h – износ по задней поверхности; β – угол заострения.

Плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента в зависимости от основных параметров процесса резания могут быть определены на основании зависимостей [4]:

$$q_1 = \frac{K_1 K_3 \lambda_u - K_2 N_2 h + K_1 M_2 h}{K_3 K_4 \lambda_u + M_2 K_4 h - N_1 N_2 l h / \lambda_u}; \quad q_2 = \frac{(K_1 - K_4 q_1) \lambda_u}{N_2 h}, \quad (1)$$

где $K_1 = \frac{(1+c)\omega_{\dot{a}} k b' q_{\dot{a}}}{\lambda_{\dot{a}} V} + \frac{K_{c1} q_{1T}}{\lambda_{\dot{a}}} \sqrt{\frac{\omega_{\dot{a}} k l}{V}}$; $K_2 = \frac{(1+c)\omega_{\dot{a}} k b' q_{\dot{a}} T_u}{\lambda_{\dot{a}} V} + \frac{K_{c2} q_{2T}}{\lambda_{\dot{a}}} \sqrt{\frac{\omega_{\dot{a}} h}{V}}$;

$K_3 = 1,82 K_{c2} \sqrt{\omega_{\dot{a}} h / V} / \lambda_{\dot{a}}$; $K_4 = 1,3 K_{c1} \sqrt{\omega_{\dot{a}} k l / V} / \lambda_{\dot{a}} + M_1 l / \lambda_u$;

$\lambda_{\dot{a}}$, λ_u , $\omega_{\dot{a}}$, ω_u – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента; M_1 , M_2 , N_1 , N_2 – безразмерные функции, определяющие нагрев контактных площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента $M_{1,2} = (4,88 + 2,64 \eta_{1,2}^{0,5} \lg \eta_{1,2}) \beta^{-0,85}$; $N_{1,2} = (0,04 + 0,02 \eta_{1,2}^{0,6} \lg \eta_{1,2}) B_{1,2}(h/l)$, ($\eta_1 = b/l$, $\eta_2 = b/h$ ($\eta_{1,2} > 1$)); $B_{1,2}(h/l)$ – специальные функции; c – коэффициент, учитывающий подогрев слоев металла стружки за один оборот детали; b' – коэффициент относительного количества теплоты, уходящего в стружку; $T_{\dot{a}}$ – безразмерная функция распределения температур в детали, вызванных теплотой деформации; k – коэффициент усадки стружки; q_{1T} , q_{2T} – плотности тепловых потоков от сил трения на площадках контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия, между задней поверхностью лезвия и дета-

лю; длина $l = 2S \sin \varphi [k(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma]$ γ - передний угол резца; φ - главный угол в плане.

Примеры расчета тепловых потоков и температур резания выполнены для различных условий тонкого точения. Обрабатываемые материалы: различные закаленные стали и высокопрочные чугуны. Инструментальные материалы: различные СТМ - эльбор-Р, киборит и гексанит. Геометрические параметры резцов: передний угол $\gamma = -7^\circ$, задний угол $\alpha = 7^\circ$, углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. Износ по задней поверхности $h = 0,1$ мм. Режимы резания: глубина резания $t = 0,8$ мм; подача $S = 0,1$ мм/об; скорость резания $V = 100$ м/мин.

Графики зависимостей плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента от скорости резания V и подачи S при обработке стали 45 HRC35 резцами из эльбора-Р, высокопрочного чугуна НВ600 резцами из киборита представлены на рис. 2.

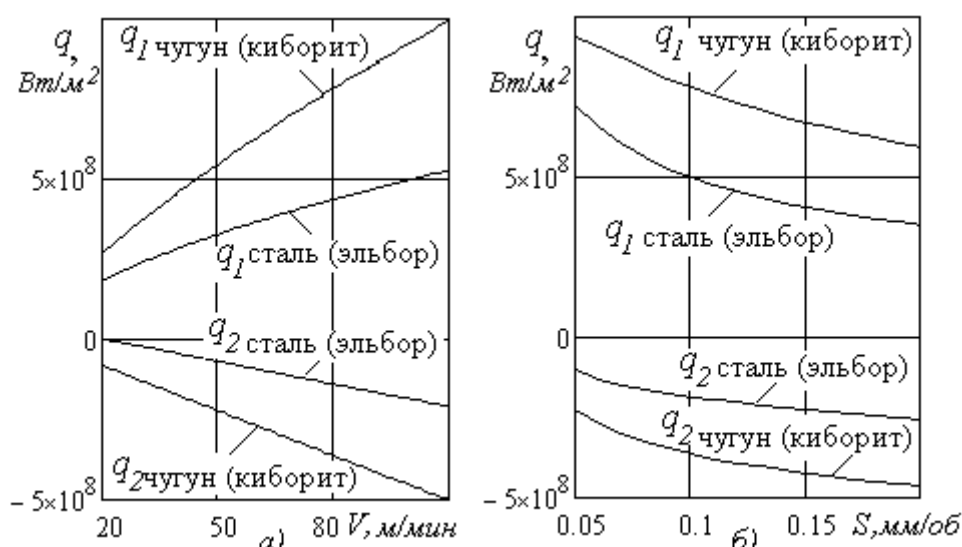


Рисунок 2. Графики зависимостей плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента от скорости резания V – а) и подачи S – б) для различных обрабатываемых и инструментальных материалов.

Для заданных условий обработки плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента при обработке чугуна значительно превышают плотности тепловых потоков при обработке стали, что объясняется снижением площади контакта стружки с передней поверхностью лезвия вследствие меньшей усадки стружки для чугуна. Плотности тепловых потоков возрастают с ростом скорости резания V , что закономерно связано с увеличением общей мощности тепловыделения при резании. Однако с увеличением подачи S и соответствующим увеличением площади контакта стружки с передней поверхностью лезвия плотности тепловых потоков уменьшаются. Отрицательные значения плотности тепловых потоков на задней поверхности лезвия q_2 свидетельствует о направлении теплового потока из инструмента в деталь, что способствует охлаждению инструмента.

На основании установленных тепловых потоков q_1 и q_2 могут быть рассчитаны средние температуры на передней Θ_1 и задней Θ_2 поверхностях лезвия инструмента, а так же температура резания Θ_p , представляющая собой среднюю температуру на передней и задней поверхностях [4]:

$$\Theta_1 = \frac{q_1 l}{\lambda_u} M_1 + \frac{q_2 h}{\lambda_u} N_2; \Theta_2 = \frac{q_2 h}{\lambda_u} M_2 + \frac{q_1 l}{\lambda_u} N_1; \Theta_P = \frac{\Theta_1 l + \Theta_2 h}{l + h}. \quad (2)$$

Графики зависимости температуры резания Θ_P , от скорости резания V при обработке стали 45 HRC35 и чугуна HB600 резцами из различных СТМ - эльбора-Р, киборита и гексанита представлены на рис. 3.

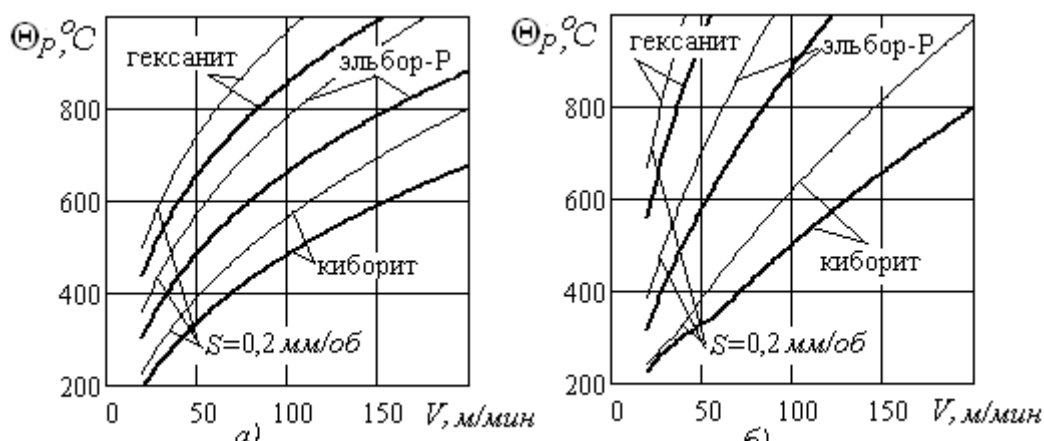


Рисунок 3. Графики зависимостей температуры резания Θ_P от скорости резания V при обработке стали 45 HRC35 – а) и чугуна HB600 – б) резцами, оснащенными различными СТМ

Температуры резания для различных инструментальных материалов различны в соответствие коэффициентами их теплопроводности. Наименьшие значения имеют температуры резания для киборита ($\lambda = 89 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$), средние – для эльбора-Р ($\lambda = 49 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$) и наибольшие – для гексанта ($\lambda = 25 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$). При обработке чугуна температуры резания, также как и тепловые потоки, выше, чем при обработке стали. Причем, для инструментальных материалов гексанита и эльбора-Р они весьма высоки и существенно ограничивают скорости резания, а, следовательно, и производительность обработки. Поэтому при обработке высокопрочного чугуна в качестве инструментального материала целесообразно использовать киборит. При обработке закаленных сталей успешно может использоваться и эльбор-Р.

Для исследования работоспособности инструмента весьма важно знать не только температуру резания, но и закономерности распределения температур, как внутри лезвия, так и на его поверхностях.

Трехмерное температурное поле в лезвии режущего инструмента $\Theta(x, y, z)$ представляет собой суперпозицию температурных полей $\Theta_1(x, y, z)$ и $\Theta_2(x, y, z)$, возникающих под влиянием источников теплоты на его передней и задней поверхностях. Плотность тепловых потоков на этих поверхностях q_1 и q_2 соответственно. Такое температурное поле с использованием перехода к безразмерным координатам описывается следующим образом [5]:

$$\Theta(x, y, z) = \Theta_1(x, y, z) + \Theta_2(x, y, z) = P_1 T_1(\psi, \zeta, \nu) + P_2 T_2(\psi, \zeta, \nu), \quad (2)$$

где $P_1 = K_\beta q_1 l / 4 \pi \lambda_u$, $P_2 = K_\beta q_2 l / 4 \pi \lambda_u$ - размерные коэффициенты: K_β - коэффициент перехода от неограниченного пространства к неограниченному клину (для $\beta = 90^\circ$ $K_\beta = 4$); $T_1(\psi, \zeta, \nu)$, $T_2(\psi, \zeta, \nu)$ - температурные поля, возникающие в лезвии режущего инструмента под влиянием источников, действующих на передней и задней поверхностях, в безразмерном виде: $\chi = h/l$ - безразмерный износ; $\eta = b/l$ - безразмерная ширина среза; $\psi = x/l$, $\psi_u = x_u/l$, $\zeta = z/l$, $\zeta_u = z_u/l$, $\nu = y/l$ - безразмерные координаты (x, y, z - координаты любой точки тела; x_u, y_u, z_u - координаты любой точки источника):

$$T_1(\psi, \nu, \zeta) = P_1 \int_0^1 d\psi_u \int_{-\eta}^{+\eta} \frac{d\zeta_u}{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \nu^2 + (\zeta - \zeta_u)^2}};$$

$$T_2(\psi, \nu, \zeta) = P_2 \int_0^\chi d\nu_u \int_{-\eta}^{+\eta} \frac{d\zeta_u}{\sqrt{(\nu - \nu_u)^2 + \psi^2 + (\zeta - \zeta_u)^2}}.$$

Описание закона распределения температур в безразмерном виде позволяет устанавливать общие закономерности изменения температур, которые для каждого конкретного варианта обработки корректируются размерными коэффициентами P_1 и P_2 .

Безразмерные температурные поля внутри лезвия режущего инструмента в сечении, перпендикулярном главной режущей кромке ($\zeta = 0$), возникающие при одновременном действии двух рассматриваемых источников, представлено на рис. 4 (для расчетов приняты значения $\chi = 0,5$; $\eta = 2,8$).

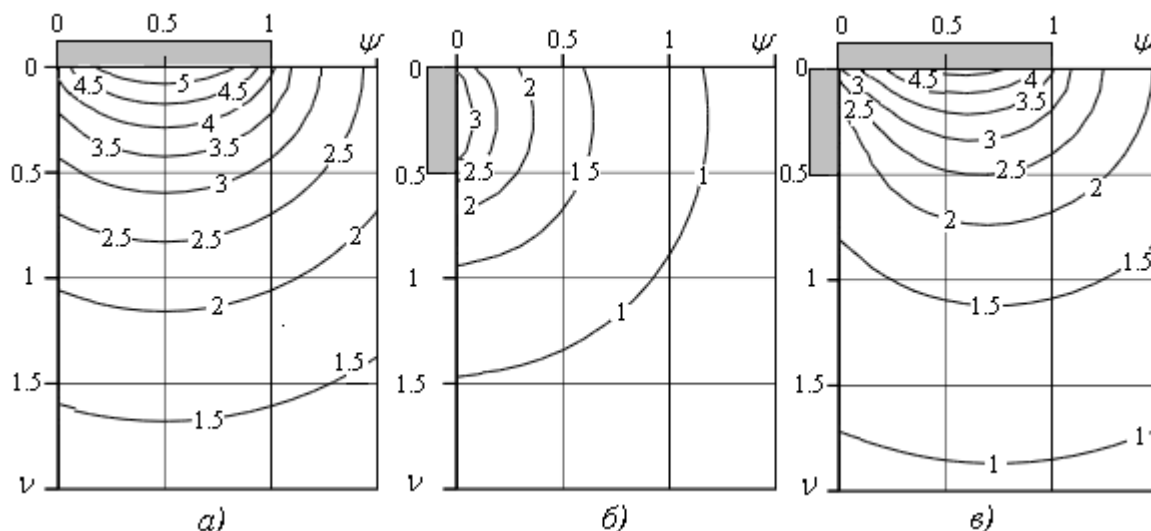


Рисунок 4. Безразмерные температурные поля в лезвии инструмента, возникающие от источника теплоты на передней поверхности – а); на задней поверхности – б); при одновременном действии источников на передней и задней поверхностях – в).

Независимо от условий обработки максимальная температура в лезвии инструмента возникает на передней его поверхности в середине площадки контакта со стружкой ($\psi = 0,5$), на задней поверхности лезвия она значительно ниже, чем на передней, и достаточно быстро убывает по мере удаления от передней и задней поверхностей. Тем-

пература в лезвии при одновременном действии источников теплоты ниже, чем при действии источника только на передней поверхности за счет охлаждающего эффекта отрицательного теплового потока на задней поверхности.

Закономерности одномерного распределения температур на передней и задней поверхностях лезвия в направлении, перпендикулярном к главной режущей кромке, с учетом одновременно действующих источников описываются следующим образом:

$$\Theta_1(x) = P_1 \int_0^1 \left[\ln \left(\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] d\psi_u + \quad (3)$$

$$+ P_2 \int_0^{\chi} \left[\ln \left(\sqrt{\psi^2 + v_u^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{\psi^2 + v_u^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] dv_u$$

$$\Theta_2(y) = P_1 \int_0^{\chi} \left[\ln \left(\sqrt{(v - v_u)^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{(v - v_u)^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] dv_u + \quad (4)$$

$$+ P_2 \int_0^1 \left[\ln \left(\sqrt{v^2 + \psi_u^2 + \eta^2} + \eta \right) - \ln \left(\sqrt{v^2 + \psi_u^2 + \eta^2} - \eta \right) \right] d\psi_u$$

На рис. 5 представлены графики распределений температур на передней и задней поверхностях лезвия для различных обрабатываемых и инструментальных материалов в ранее указанных условиях обработки.

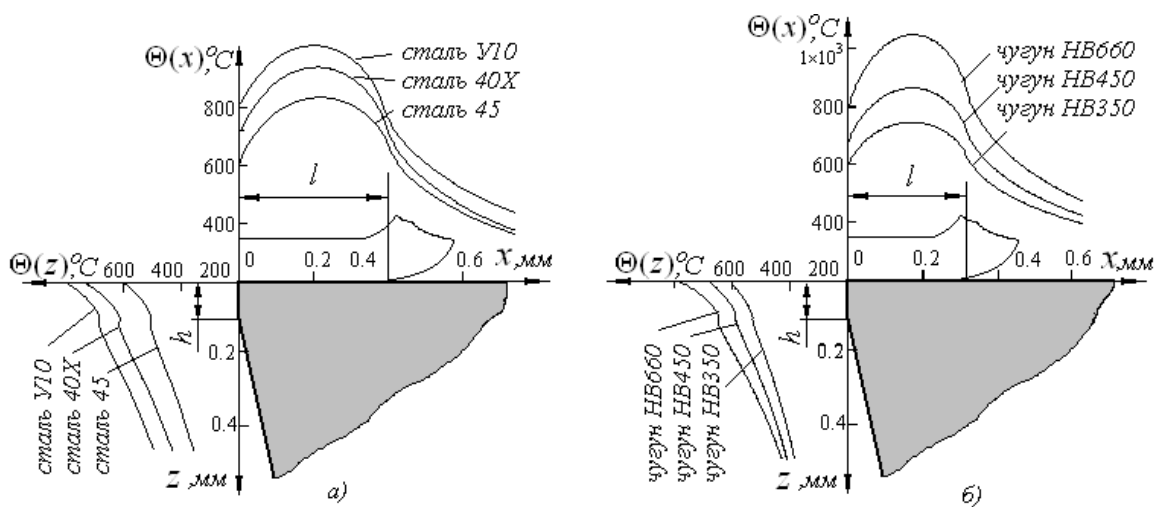


Рисунок 5. Графики распределений температур на передней и задней поверхностях лезвия режущего инструмента для различных сталей резцами из эльбора - а) и различных чугунов резцами из киборита – б).

При сохраняющихся общих закономерностях распределения температур на передней и задней поверхностях лезвия более высокие температуры возникают при обработке сталей с более высокой прочностью и меньшей теплопроводностью (рис. 5а), а также чугунов с более высокой твердостью (рис. 5 б).

Таким образом, с использованием представленной методики может успешно решаться задача определения тепловых потоков и температур в зоне резания для лю-

бых условий тонкого точения инструментами, оснащенными СТМ.

Выводы.

С использованием представленной методики выполнен сравнительный анализ тепловых потоков и температур резания при тонком точении закаленных сталей и высокопрочных чугунов инструментами, оснащенными различными СТМ. Установлены общие закономерности изменения тепловых потоков и температур резания в зависимости от режимов резания.

Исследованы особенности формирования температурного поля в лезвия режущего инструмента с учетом источников теплоты, одновременно действующих на его передней и задней поверхностях. Установлены основные закономерности распределения температур на передней и задней поверхностях лезвия инструмента из СТМ в зависимости от свойств обрабатываемых и инструментальных материалов.

Разработанная методика определения тепловых потоков и температур в зоне резания может быть широко использована для выбора рациональных условий обработки любых видов режущих инструментов, оснащенных СТМ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.
2. Ивченко, Т. Г. Оценка эффективности использования СОТС при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ. – 2016. – № 1(52). – С. 62-68.
3. Мелещик, В. А. Опыт применения композитов при точении чугунных прокатных валков / В. А. Мелещик, Ю. Г. Кравченко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – С. 81-84.
4. Ивченко, Т. Г. Исследование тепловых потоков и температур резания при обработке инструментами с износостойкими покрытиями / Т. Г. Ивченко, И. А. Петряева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ, 2015. – № 1(51). – С. 84-89.
5. Ивченко, Т. Г. Исследование общих закономерностей изменения температуры резания в различных условиях обработки / Т. Г. Ивченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. – № 6. – С. 49-55.
6. Ивченко, Т. Г. Закономерности изменения температур резания в зависимости от износа режущего инструмента для различных условий обработки / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ. – 2014. – № 4(50). – С. 102-106.

Поступила в редколлегию 04.02.2020 г.

УДК 62-965

П. Д. Кравченко, проф., д-р техн. наук, **Д. Н. Федоренко**, инженер-конструктор
Волгодонский инженерно-технический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Россия
ООО «Атомспецсервис», Россия
Тел./Факс: +7 (918) 511-13-11; E-mail: krava21@yandex.ru

ДИССИПАЦИЯ КРЕАТИВНОГО ВРЕМЕНИ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ТЯЖЕЛОГО И АТОМНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В работе представлен анализ времени создания нового объекта в тяжёлом и атомном машиностроении в разные временные промежутки – от идеи до конечного результата. Показаны примеры диссипации креативного времени.

Ключевые слова: время, производство, тяжелое и атомное машиностроение.

P. D. Kravchenko, D. N. Fedorenko

DISSIPATION OF CREATIVE TIME OF CREATION OF PRODUCTS OF HEAVY AND NUCLEAR ENGINEERING

In the paper analyses of time, producing objects of heavy and nuclear industries in periods from idea to result are represented. Reasons of erective time dissipation are shown.

Keywords: time, production, heavy and nuclear engineering.

Время создания изделий в любой технической системе (ТС) является одним из главных факторов процесса появления нового объекта.

Главной целью создания нового изделия, как правило, является получение запланированного результата с минимальными затратами, что можно объяснить процессом оптимизации. В таком процессе необходимо, например, учитывать ограничения в тяжелом и атомном машиностроении – это ограничения, характеризующие безопасность жизнедеятельности [1].

При создании нового объекта процесс оптимизации характеризуется взаимодействием многих факторов, одним из которых является фактор времени, который, как правило, стремится к уменьшению [2].

Существуют отрасли машиностроения, которые исключаются из системы открытого научного анализа из-за ограничений политического характера, государственной и военной тайны – это судовое, авиационное, космическое, военное машиностроение. Однако даже эти отрасли создаются согласно известным технологическим процессам и ограничениям, включая изобретательские приёмы, которые следует применять в новых технологиях на более высоком креативном уровне.

Множество факторов и ограничений в ТС рассмотрим с помощью теоретического анализа в виде математических формул. Фактор креативного времени создания объекта представлен в формуле (1):

$$T_i = f(M, N_T, C), \quad (1)$$

где T_i – фактор времени изготовления нового изделия

M – фактор времени изготовления, зависящий от материалоемкости объекта;

N_T – фактор времени, зависящий от количества технологических операций;

C – фактор времени, зависящий от сложности технологических операций.

В формуле (1) изменение фактора времени зависит от основных параметров изменения технологического процесса изготовления объекта. Составляющие общего фактора T_i следует рассмотреть более подробно.

Изменение фактора времени, зависящего от материалоемкости объекта, можно определить согласно формуле (2):

$$M = f(m_{ct}, m_{cn}, m_{nl}, m_c), \quad (2)$$

где m_{ct} – составляемая фактора времени, зависящая от массы основных конструктивных элементов, изготавливаемых из машиностроительных материалов – стали, чугуна...; m_{cn} – цветных металлов и сплавов; m_{nl} – пластмассы и композитных материалов; m_c – смазочных, горюче-смазочных материалов гидравлических и пневматических систем.

Формула (2) определяет зависимости изменения фактора времени при использовании всех применяемых материалов с учётом получения требуемого качества технологического процесса изготовления объекта.

В качестве примера можно представить ситуацию, когда для изготовления объекта можно использовать несколько марок сталей с характеристиками, соответствующими предъявленным требованиям для качественного изготовления объекта. [3] В таком случае происходит процесс с использованием фактора времени, зависящего от количества технологических операций, что представлено в формуле (3):

$$N_T = f(n_n, n_T, n_a, n_c) \quad (3)$$

где n_n – фактор времени, определяющий количество и длительность операций с изменением первоначального состояния объекта (и плавки)

n_T – термообработка;

n_ϕ – изменение формы (ковка, штамповка), механическая обработка,

n_c – контрольные операции.

Составляющие общего фактора времени в формуле (3) определяются согласно нормативным техническим параметрам.

Сложность любого технического процесса, определяющая значение фактора времени C , можно определить согласно формуле (4):

$$C = f(c_n, c_{cn}, c_{но}), \quad (4)$$

где c_n – фактор времени, определяющий сложность операции изготовления в зависимости от сложности оборудования;

c_{cn} – количество сложных операций и $c_{но}$ – количество сложных операций на новом оборудовании, требующим применения новых изобретательских приёмов для получения конечного положительного результата.

Фактор креативного времени, представленный фрагментами формул (1) ... (4), отображает ТС изготовления объектов тяжёлого и атомного машиностроения только в процессе изготовления объекта.

Полное время изготовления объекта должно включать фрагменты времени от идеи (замысла) до использования в практической эксплуатации, что определяется формулой (5):

$$T_\Sigma = f(T_i, T_{np}), \quad (5)$$

где T_i – время, определяемое формулой (1);

T_{np} – время, определяемое периодом проектирования, включая обязательное выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР).

Фактор времени, определяемый в период проектирования и НИОКР, определяется по формуле (6):

$$T_{np} = f(N_p, N_k, Y_{nn}) \quad (6)$$

где N_p – время определения количества руководителей проекта; N_k – время определения количества конструкторов, технологов ученых, специалистов по проекту и выполнения НИОКР;

Y_{nn} – время выбора участников – исполнителей проекта в зависимости от уровня их профессиональной подготовленности.

Формула (6) только обозначает фактор времени проектирования объекта и не учитывает влияние человеческого фактора в социальном плане и организации самого процесса проектирования: учёт ошибочных решений, применение изобретательских решений, использования быстродействующих вычислительных машин, создания новых программных методических материалов и т. д.

Внимательно анализируя содержание формул (1) ... (6), приходим к вводу о практически неограниченном количестве вариантов решений при создании нового объекта. Кроме того, можно добавить в указанные формулы другие фрагменты, приближающие к оптимальному результату решения.

Рассмотрим вариант оценки фактора креативного времени создания объекта на примере организации технологического процесса изготовления крупногабаритных тяжёлых деталей и узлов атомного машиностроения.

Существующая система СПИД – «станок – приспособление – инструмент – деталь» может быть успешно заменена системой ДИПС – «деталь – инструмент – приспособление – станок» при изготовлении крупногабаритных массивных объектов. Станок в данном случае превращается в мобильный малооборотный блок, который базируется на детали, которая в этом случае является жёсткой базой. Это снижает удельную металлоёмкость технологического процесса.

Традиционно в тяжёлом и атомном машиностроении для изготовления объектов строят огромные производственные корпуса, в которых размещают крупногабаритное оборудование и станки, согласно специализированной системе, СПИД. [4, 5]

Предложенная новая концепция применения мобильных блоков по системе ДИПС - отказ от громадных производственных помещений с мостовыми кранами грузоподъемностью в сотни тонн и применение вместо них напольного транспортного оборудования - представлена эскизно на рисунке 1.

Основные характеристики существующей схемы: а) наличие значительно превышающих по размерам обрабатываемого объекта всех составных элементов технологической системы – основания, опорных колон, элементов перемещения, мостового крана, технологического оборудования для обработки и перемещения объекта.

Схема рисунка 1, б характеризуется концепцией уменьшения всех размеров технологической системы обработки объекта – как производственного помещения, так и оборудования.

Предварительно, ориентировочные результаты расчёта удельной металлоёмкости на 1 погонный метр цеха для этих систем показали, что $M_{уд}$ схемы рисунка 1, б в десятки и сотни раз меньше, чем для схемы рисунка 1, а.

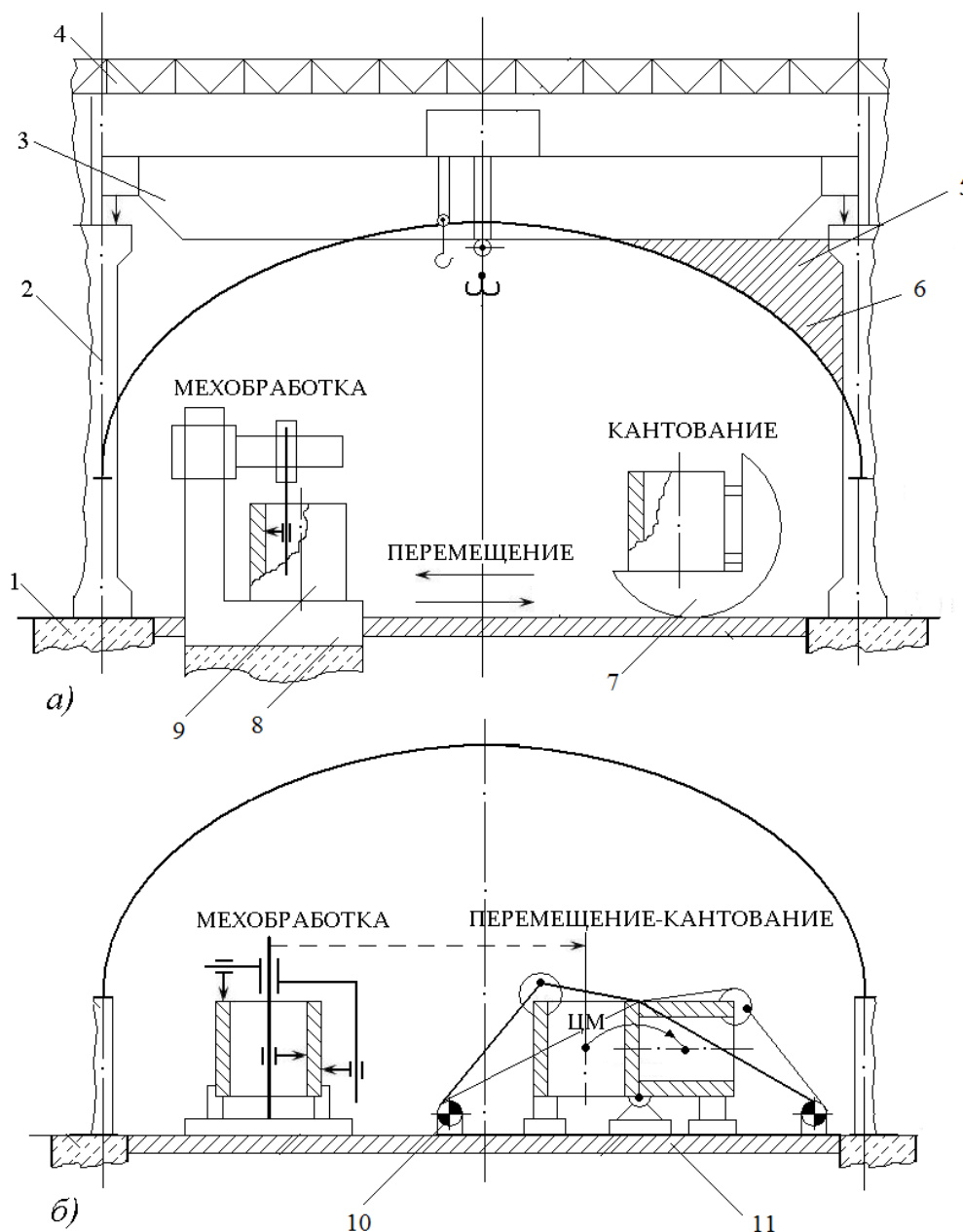


Рисунок 1. Базовая модель концептуального развития: а) существующая система; б) предложенная модель; 1 - фундамент; 2 - колонны; 3 - мостовой кран; 4 - металлоконструкции кровли; 5 - неиспользуемое пространство; 6 - граница пространства проектируемого помещения; 7 - напольный кантователь; 8 - карусельный станок; 9 - обечайка; 10 - канатная лебедка; 11 - подвижная опора. ЦМ - центр масс объекта.

Процесс проектирования характеризуется фактором времени, заявляющем от элементов системы в целом; проектирования, отдельных оставляющих системы; например, определяемой оптимальной минимальной удельной материалоемкостью $M_{уд}$, можно исследовать с помощью схемы, представленной на рисунке 2.

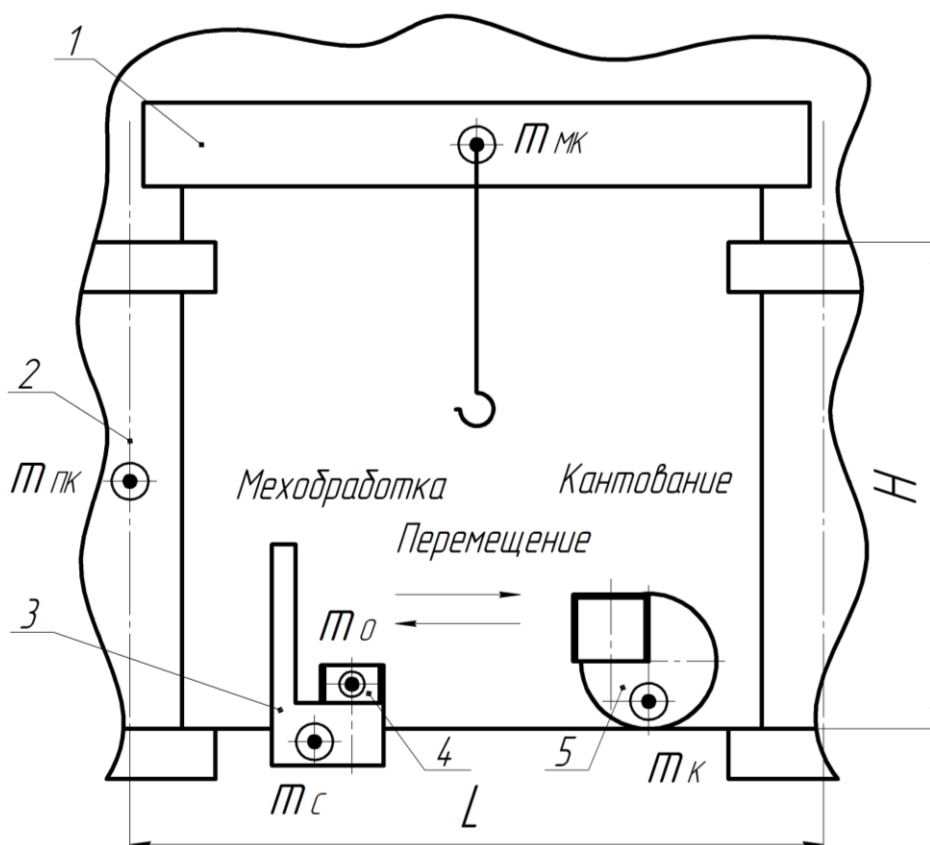


Рисунок 2. Существующая схема механической обработки обечаек в атомном машиностроении.

Массы мостового крана m_{mk} опорного подкранового основания $m_{пко}$ станка m_e , обрабатываемой детали-объекта m_o и напольного кантователя m_k являются как статическими, так и перемещаемыми (мостовой кран вместе с обечайкой).

Ориентировочно можно оценить критерий качества проектирования $M_{yд}$, принимая средние величины масс объектов, например, вес объекта в среднем принимаем равный 100 тс, кантователя 110 тс, станка и мостового крана в 5...10 раз больше. Вес производственного сооружения – на два порядка больше. Поскольку технологическое оборудование рассчитано на обработку всего крупногабаритного тяжёлого комплекта деталей и узлов атомного машиностроения, то его размеры, вес и энергонасыщенность проектируется, исходя из максимальных значений указанных материалов. Критерий качества проектирования по удельной материалоемкости определяется по формуле (7):

$$M_{yд} = \frac{m_{mk} + m_{пк} + m_c + m_k}{m_o}, \quad (7)$$

Критерий удельной энергоёмкости $E_{yд}$ определяется по формуле 8:

$$E_{yд} = \frac{E_{mk} + E_{пк} + E_c + E_k}{m_o}; \quad (8)$$

где E_{mk} , $E_{ст}$, $E_{й}$, $E_{ек}$ – установленные мощности приводов соответственно мостового крана, станка, средства перемещения и кантования в кВт.

Один из примеров применения мобильных блоков представлен в рисунке 3.

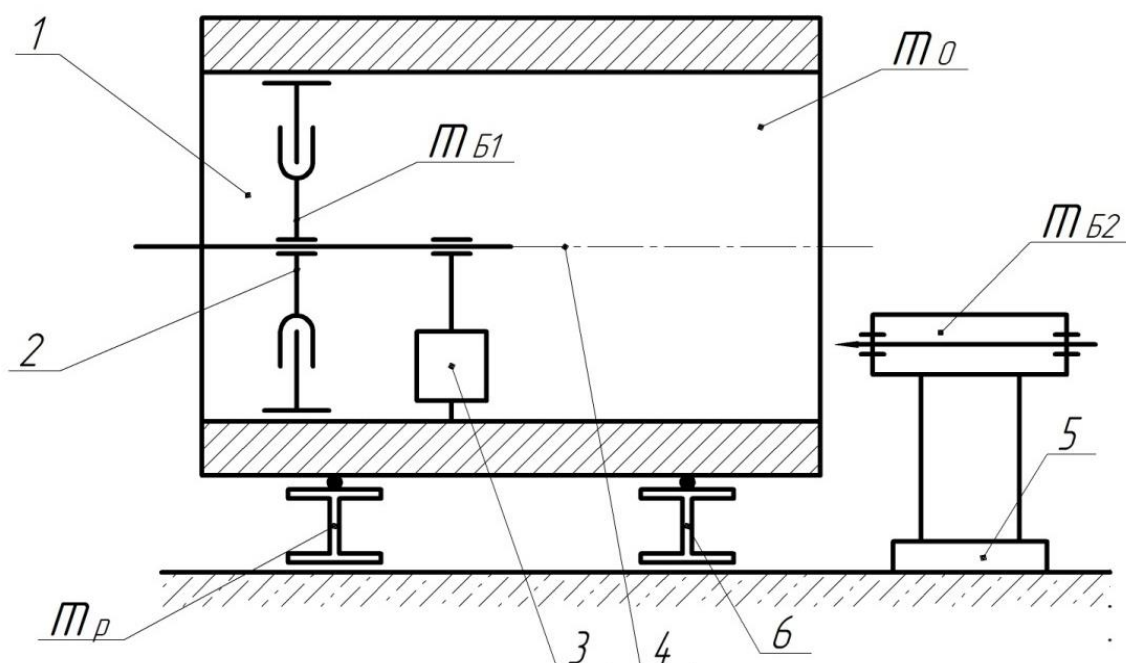


Рисунок 3. Проектная модель обработки обечайки на роликоопорном стенде с мобильными металлорежущими блоками. 1 – обечайка, 2 – опорный блок; 3 – блок обработки; 4 – базовая траверса; 5 – блок обработки торца; 6 – ролик опоры.

Расчёт M_{y0} на схеме рисунка 3 производится аналогично формуле (7) и здесь не приводится.

Формулы (1) – (6) содержат огромный объём информации, характеризующий влияние отдельных элементов системы создания новых объектов при диссипации креативного времени развития машиностроения и техносферы.

Последовательный анализ элементов формулы (1) и далее формул (2) ... (4) приводит к логическому заключению: чем больше материалов используется при изготовлении объекта, тем он тяжелее, чем больше операций в принятой ТС и чем сложнее ТС – тем больше времени расходуется на изготовления объекта. Отметим традиционный консерватизм при разработке технологических операций – следование нормам и правилам, согласно системе СПИД и стандартам, определяющим применяемую технологическую систему с ограничениями, обеспечивающую безопасность жизнедеятельности человека.

Влияющие факторы времени, определяемые по формулам (5) и (6), зависят от человеческого фактора, т.к. процесс проектирования и выполнения НИОКР в большей степени зависит от профессионализма проектировщиков, поведения лиц, принимаемых решение (ЛПР) а также от политических и социально-экономических условий в общем процессе создания нового объекта.

Все параметры в формулах (1) ... (8) могут быть оптимизированы. В нашем случае основной параметр – фактор времени $t \rightarrow \min$. Производственный процесс получения нового изделия не всегда допускает уменьшение времени отдельных операций, что составляет ограничения, особенно по условиям термической обработки.

Употребление термина «ускорение технического прогресса» в изданных ранее литературных источниках следует понимать, как уменьшение диссипации креативного

времени создания объектов новой техники. Уменьшить диссипацию можно, применяя различные способы:

1. Повышение уровня профессионализма создателей новой техники.
2. Устранение из процесса производства непрофессиональных ЛПП.
3. Максимальное использование в процессе НИОКР изобретателей и рационализаторов [6].
4. В системном анализе управления на всех этапах создания новой техники запланировать активный мозговой штурм с целевой установкой $t \rightarrow \min$.
5. Перед началом производства нового объекта определить критерий оптимальности элементов системы проектирования и изготовления объектов.

Указанные способы являются общеизвестными, однако на практике применяются не всегда.

Настоящая статья предложена для обсуждения. Профессиональные ученые, конструкторы, технологи, изобретатели и опытные производственники могут оказать полезную помощь в проблеме снижения диссипации креативного времени создания новых образцов техники перспективного уровня совершенства.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кравченко, П. Д. Подвесные грузозахватные и манипулирующие устройства [Текст] / П. Д. Кравченко, Д. Н. Федоренко – М.: НИЯУ МИФИ; Волгоград: ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – 284 с.

2. Кравченко, П. Д. Развитие концепции оптимального технологического процесса обработки объектов тяжёлого машиностроения / П. Д. Кравченко // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XII международной научно-технической конференции в г. Севастополь 12-17 сентября 2005 г. В 5 т. – Донецк: ДонНТУ, 2005. - Т. 2. – 311 с.

3. Kravchenko, P. D. New Approaches To The Substantiation Of The Concept Of Optimum Of The Technological Process Of Manufacturing Facilities Of Atomic Power Engineering / Кравченко П. Д. Новые подходы к обоснованию концепции оптимального технологического процесса изготовления объектов атомного энергетического машиностроения [Текст] // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 14(2005)pp/ 34171-34173 © Research India Publications = Международный журнал прикладных инженерных изысканий. – 2015. – Т. 10. – № 14. – С. 34171-34173.

4. Кравченко, П. Д. Целесообразность применения мобильного технологического оборудования при изготовлении изделий атомного машиностроения / П. Д. Кравченко // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №2 (15) – С. 30-34.

5. Kravchenko P. D., Yablonovsky I.M., Fedorenko D.N. New engineering decisions in nuclear engineering = Кравченко П. Д., Яблоновский И. М., Федоренко Д. Н. Новые инженерные решения в атомном машиностроении [Текст] / ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 11, № 3, February (2016) pp/ 1951-1955/ = ARPN Журнал инженерных и прикладных наук. – 2016. – Т. 11. №3, февр. – С. 1951-1955.

6. Кравченко, П. Д. Концепция проектирования транспортного оборудования при работе в особых условиях / П. Д. Кравченко, Д. Н. Федоренко // Машиностроительные технологии и техника автоматизации – 2012: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. 9-15 июля 2012 г., г. Ереван. – Ереван, 2012. – С. 207-210.

Поступила в редколлегию 13.02.2020 г.

УДК 621.7.075

В. А. Лебедев, канд. техн. наук, проф., **Ю. А. Тороп**, ведущий инженер,
О. Е. Барышникова, старший преподаватель

Донской государственный технический университет, Россия

Тел./ Факс: +7 9515395159; E-mail: va.lebidev@yandex.ru

ДОРНОВАНИЕ ШЛИЦЕВЫХ ОТВЕРСТИЙ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА

Описана сущность отделочно-упрочняющей обработки шлицевых отверстий фасонными дорнами. Проведён анализ технологических параметров процесса дорнования. Показано что основным технологическим параметром, обуславливающим эффективность обработки, является тяговое усилие. Предложена технологическая схема дорнования шлицевых отверстий зубчатых колёс, обеспечивающая его снижению путём наложения на обрабатываемую деталь ультразвукового поля.

Ключевые слова: дорнование, фасонный дорн, шлицевое отверстие, тяговое усилие, ультразвуковое поле.

V. A. Lebedev, Yu. A. Torop, O. E. Baryshnikova

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF BURNISHING SPLINE HOLES UNDER THE INFLUENCE OF AN ULTRASONIC FIELD

The essence of the finishing and hardening treatment of splined holes with shaped mandrels is described. The analysis of the technological parameters of the burning process. It is shown that the main technological parameter that determines the processing efficiency is traction. A technological scheme for the burning of splined holes of gear wheels is proposed, which ensures its reduction by applying an ultrasonic field to the workpiece.

Keywords: mandrel, shapon mandrel, slotted hole, traction force, ultrasonic field.

1. Введение

Дорнование является одним из эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки шлицевых отверстий деталей машин пластическим деформированием, который осуществляется фасонными дорнами путём проталкивания или протягивания их сквозь шлицевое отверстие или на прессе, или на протяжном станке [1]. Этот метод обеспечивает увеличение производительности обработки, повышение точности отверстий, высвобождение дорогостоящего режущего инструмента, исключение брака и повышение эксплуатационных свойств деталей.

На сегодняшний день в результате проведённых исследований в области обработки дорнованием решен целый комплекс вопросов, обуславливающих его практическое применение [2, 3]. Разработана конструкция шлицевого дорна (рисунок 1), обеспечивающая эффективную реализацию процесса дорнования при помощи рабочих органов в виде твердосплавных пластин 2, имеющих: заборные и обратные конуса по наружному диаметру и боковым поверхностям шлица и калибрующие ленточки.

Определены геометрические параметры рабочих поверхностей фасонных дорнов, которые играют весьма важную роль в процессе дорнования, так как они оказывают существенное влияние на условия деформирования поверхностного слоя металла, изменение тяговых усилий, качество обработанной поверхности, износостойкость дорнов. Установлены основные технологические параметры процесса дорнования, обуславливающие механизм поверхностного пластического деформирования и формирова-

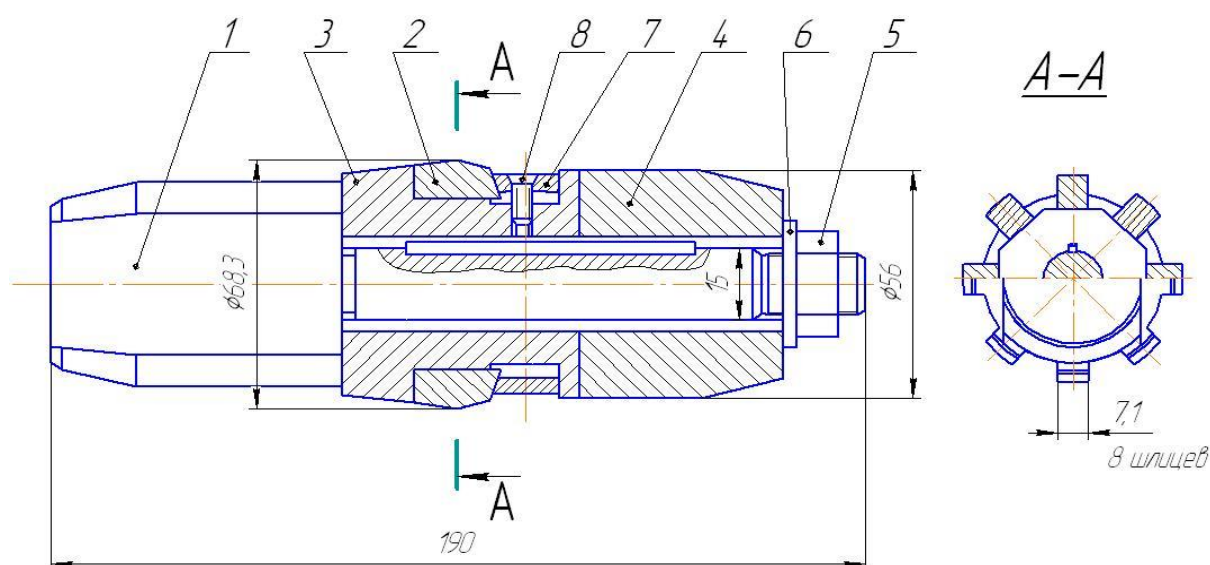


Рисунок 1. Фасонный дорн для калибровки шлицевых отверстий: 1-оправка, 2-твердосплавные пластины, 3-корпус, 4-втулка, 5-гайка, 6-шайба, 7-сухарик, 8-винт

ние геометрических и физико- механических характеристик качества поверхностного слоя.

В задачу настоящих исследований входило проведение анализа закономерностей влияния технологические параметров на процесс дорнования и выработка предложений по повышению его технологической эффективности.

2. Технологические параметры процесса дорнования

При обработке шлицевых отверстий дорнованием основными технологическими параметрами процесса являются геометрия инструмента, тяговые усилия, натяг и скорость дорнования. Обобщая результаты теоретических и экспериментальных исследований можно констатировать следующее [2, 3].

Одним из важнейших элементов, определяющих форму рабочей поверхности дорна, являются углы заборного конуса. Заборной частью осуществляется основная деформация обрабатываемого металла и от неё в значительной степени зависит усилие дорнования P_T и качество поверхности (рисунок 2). При правильном выборе углов заборных конусов шлицевых дорнов тяговое усилие будет минимальным, высота шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия также будет получаться наименьшей, ввиду преимущественного радиального течения металла. Установлено, что оптимальная геометрия дорнующего инструмента $\alpha=4^\circ-5^\circ$ обеспечивает наивысшее качество обработанной поверхности шлицевого отверстия и наименьшую величину тягового усилия дорнования.

В процессе калибрования фасонными дорнами в поверхностном слое шлицевого отверстия обрабатываемой детали протекают упругие и пластические деформации по профилю, которые приводят к изменению его напряжённого состояния и как следствие оказывают значительное влияние на точность размеров шлицевых отверстий. Величина остаточной деформации поверхности шлицевого отверстия при калибровании зависит

от: величин натягов по наружному диаметру – i_D и боковой поверхности шлицев – i_B ; физико-механических свойств обрабатываемого материала, толщины стенки втулки, схемы деформирования поверхностей отверстия. Как показано на рисунке 3 зависимость величин остаточных деформаций металла по поверхности наружного диаметра шлицевого отверстия $(\delta_{D1})_{ост}$ от натяга дорнования i_D имеет, примерно, прямолинейный характер и малый угол наклона к оси абсцисс. Это свидетельствует о том, что остаточная деформация по наружному диаметру шлицевого отверстия при дорновании на-

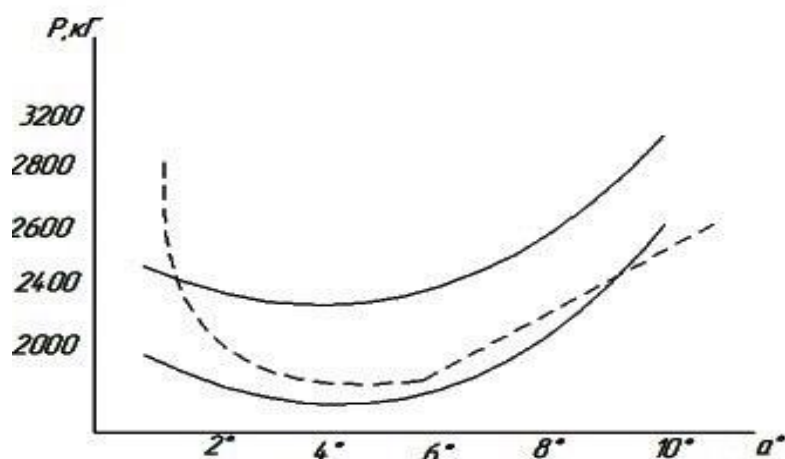


Рисунок 2. Изменение тяговых усилий P в зависимости от величины заборного угла α ; обрабатываемые материалы – стали марок: 20Х - цементированная и закалённая до твердости HRC 58-62 (верхняя дуга); 40Х закалённая до твердости HRC 48-52 (пунктирный график); 40Х закалённая до твердости HRC 48-52 (нижний график).

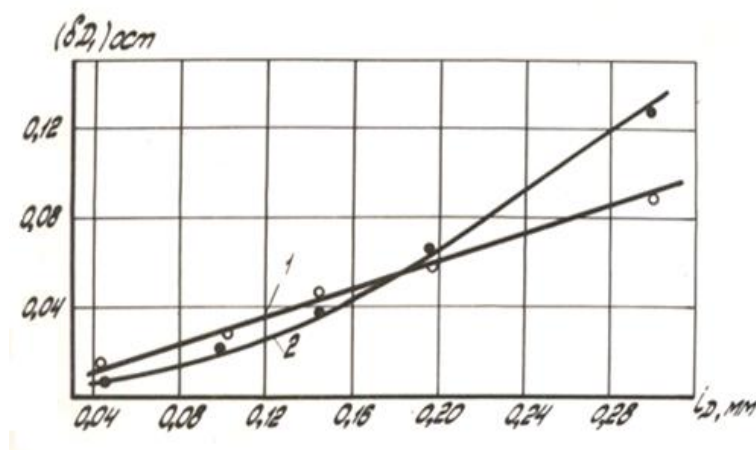


Рисунок 3. Изменение остаточных деформаций $(\delta_{D1})_{ост}$ металла по поверхности наружного диаметра шлица от величины натяга i_D : 1 – сталь 40Х, объёмно-закалённая до твердости HRC 48-52; 2 – сталь 20Х, цементированная на глубину 0,8-1,1 мм и закалённая до твердости HRC 58-62.

ного меньше натяга дорнования. Следовательно величины обратных упругих деформаций в этом случае из общей суммы абсолютной деформации (натяг дорнования i_D) имеет наибольшее значение. Свое начало на оси абсцисс прямая берет от некоторой положительной величины натяга, так как при меньших натягах обрабатываемая втулка находится в режиме чистых упругих деформаций и остаточных деформаций не имеет.

Таким образом, на основе величины остаточных деформаций по профилю шлицев, можно правильно подобрать рациональные натяги дорнования и обеспечить получение шлицевых отверстий и деталей в пределах требуемой точности.

Определение тягового усилия при дорновании шлицевых отверстий имеет большое практическое значение, так как, зная заранее величину усилия, можно правильно выбрать конструктивные размеры протяжного станка или

пресса, рассчитать инструменты, приспособления и обрабатываемую деталь на прочность и устойчивость. С учетом тягового усилия можно правильно назначить оптимальную геометрию инструментов - дорнов, обеспечивающую при всех прочих равных условиях, наименьшее значение тягового усилия.

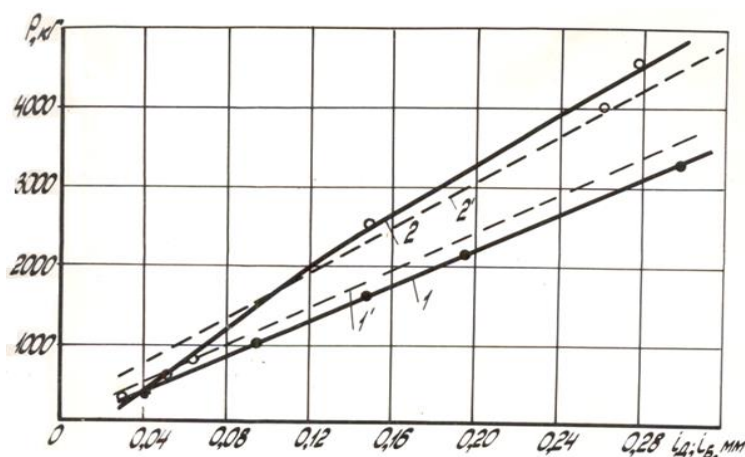


Рисунок 4. Зависимость тяговых усилий P от величины натяга дорнования образцов из:

- 1- стали 40X, объёмно-закалённой до твёрдости HRC 48-52;
- 2- стали 20X, цементированной на глубину 0,8-1,1 мм, и закалённой до твёрдости HRC 40-45

На рисунке 4 представлен график зависимостей тяговых усилий P от натяга i_D из которого видно, что тяговые усилия при обработке, объёмно-закалённой стали 40X и стали 45 с увеличением натяга дорнования i_D значительно возрастают примерно по прямолинейному закону.

При дорновании же образцов из цементированной и закалённой стали 20X тяговые усилия с увеличением натяга дорнования по наружному диаметру шлица i_D значительно возрастает, примерно по прямолинейному закону только до

величины натяга $i_D=0,13$ мм, свидетельствует о том, что при этом происходит деформирование только поверхностных слоёв металла. После превышения этого натяга рост тяговых усилий становится менее интенсивным, и кривая плавно изгибается, так как при натягах, больших $i_D=0,13$, происходит пластическое деформирование металла, лежащего ниже цементированного слоя и имеющего меньшую твёрдость, и поэтому металл оказывает меньшее сопротивление деформированию. Начиная с натяга $i_D=20$ мм тяговые усилия продолжают возрастать примерно по прямолинейному закону, указывая на то, что при этих натягах пластическим деформированиям подвергаются не только слои металла, лежащие под цементированным слоем, но и сам цементированный слой.

3. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс дорнования

Основным технологическим параметром процесса дорнования, обуславливающего технико-экономическую эффективность отделочно-упрочняющей обработки шлицевых отверстий, как было показано является тяговое усилие. Зная заранее величину усилия, можно правильно выбрать конструктивные размеры протяжного станка или пресса, рассчитать инструменты, приспособления и обрабатываемую деталь на прочность и устойчивость. С учетом тягового усилия можно правильно назначить оптимальную геометрию инструментов – дорнов, обеспечивающую при всех прочих равных условиях, наименьшее значение тягового усилия.

Наряду с вышерассмотренными факторами, оказывающими влияние на тяговое усилие процесса дорнования, определяющими в обосновании её величины являются механические свойства материала обрабатываемого материала и физико-механические

характеристики качества поверхностного слоя шлицевого отверстия, сформированного на операциях предшествующих дорнованию, а также геометрические размеры шлицевого отверстия. Экспериментально установлено [2], что при дорновании деталей, изготовленных из материалов с большим пределом текучести, требуются большие тяговые усилия, и, наоборот, чем меньше предел текучести, тем меньше тяговые усилия. Применение больших тяговых усилий требуется для дорнования термобработанных шлицевых отверстий, имеющих поверхностную твердость после закалки 50...55HRC. При выборе тяговых усилий необходимо также учитывать номинальный размер шлицевого отверстия. Шлицевым отверстиям с большим номинальным размерам соответствует большие тяговые усилия, так как объем и работа деформирования при этом получаются больше.

Из этого следует, что технико-экономическая эффективность процесса дорнования шлицевых отверстий зависит от рационального выбора тягового усилия. Для решения этой задачи необходимо обеспечить управление напряжённым состоянием поверхностного слоя в зоне контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью.

В качестве одного из путей управления напряжённым состоянием поверхностного слоя предлагается наложение ультразвуковых воздействия на процесс дорнования. В работах [4] показано, что ультразвуковые колебания снижают внутреннее трение в материале в результате чего создаются более эффективные условия воздействия инструмента на него.

На рис. 5 представлена принципиальная схема процесса дорнования шлицевых отверстий с наложением на него ультразвукового поля.

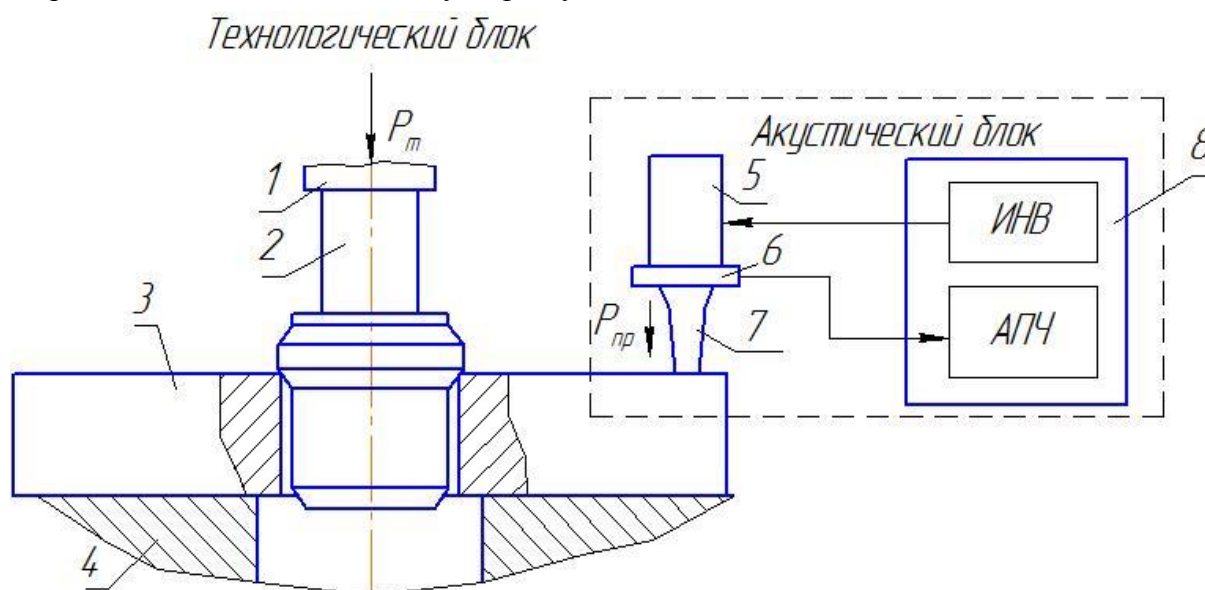


Рисунок 5. Схема процесса дорнования шлицевого отверстия зубчатого колеса с применением ультразвукового поля: 1-силовой шток, 2- фасонный дорн, 3-зубчатое колесо, 4-, установочный стол, 5- магнитострикционный преобразователь, 6-датчик акустической обратной связи, 7- волновод, 8 – генератор (АПЧ-система автоподстройки частоты, ИНВ- инвертор)

Предлагаемая схема состоит из двух блоков: технологического, реализующего процесс дорнования шлицевого отверстия фасонным дорном и акустического, создаю-

щего в материале детали (или инструменте) сложное акустическое поле. Основными элементами акустического блока являются: ультразвуковой генератор, предназначен для того чтобы электрический ток промышленной частоты 50 Гц преобразовать в электрические колебания частотой 22 кГц магнитно-стрикционный преобразователь, преобразующий электрическую частоту в диапазоне 22 кГц в механические перемещения; волновод, который формирует в детали сложное акустическое поле путём трансформации продольных колебаний в продольно-крутильные.

Наложение на деталь акустического поля обеспечивает повышение эффективности работы всей технологической системы за счёт знакопеременных изменений геометрических размеров детали в радиальном и тангенциальном направлениях, обусловленных протеканием в материале детали с высокой скоростью волновых процессов приводящих к снижению её напряжённого состояния.

4. Заключение

Достичь эффективной калибровки шлицевого отверстия детали фасонным дорном при уменьшении тягового усилия позволяет использование при ППД энергии ультразвуковых колебаний, оказывающих существенное влияние на характер контактного взаимодействия инструмента и поверхности детали. При использовании ультразвукового воздействия на инструмент обеспечивается существенное уменьшение трения и увеличение пластичности в очаге деформации, что обуславливает сглаживание шероховатости поверхностей шлицевого отверстия, способствует глубокой пластической и упругопластической проработке поверхностного слоя, созданию благоприятных сжимающих напряжений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Проскуряков, Ю. Г. Объемное дорнование отверстий / Ю. Г. Проскуряков, В. Н. Романов, А. Н. Исаев. – М.: Машиностроение, 1984. – 223 с.
2. Берберов, С.А. Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях / С. А. Берберов, В. А. Лебедев // Научные технологии в машиностроении. Научно-технический и производственный журнал №9(75). – Брянск, 2017. – С. 38-41.
3. Берберов, С. А. Инструмент для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях / С. А. Берберов, А. Г. Болокан // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: сб. науч. тр. междунар. научн.-техн. конф. ДГТУ. – Ростов н/Д, 2014. – С. 22-29.
4. Абрамов, О. В. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов / О.В. Абрамов, А. И. Манохин. – М.: Наука, 1986. – 265 с.
5. Физические основы ультразвуковой технологии / Л. Д. Розенберг и др.; под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 688 с.

Поступила в редколлегию 06.02.2020 г.

УДК 621.45.0.002.2(075.8)

¹ Д. А. Михайлов, канд. техн. наук, доц., ² В. А. Михайлов, инженер,¹ Е. А. Шейко, канд. техн. наук, доц., ² А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.¹ ГОУВПО «Донецкая академия гражданской защиты», г. Донецк, ДНР² ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНРТел.: +38 071 3060879; E-mail: mntk21@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе выполнен анализ особенностей эксплуатации лопаток газотурбинного двигателя. При этом установлено, что элементы лопатки изнашиваются неравномерно и это значительно снижает их ресурс. Предложен общий подход обеспечения свойств лопаток на базе многослойных функционально-ориентированных покрытий. Эти покрытия позволяют решать вопросы повышения ресурса лопаток, их ремонтпригодности и многократного восстановления. В статье разработан технологический метод реализации многослойных функционально-ориентированных покрытий лопаток. А также предложено необходимое технологическое обеспечение для формирования функционально-ориентированных покрытий лопаток газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: лопатка, газотурбинный двигатель, свойства, функционально-ориентированное покрытие, структурирование многослойного покрытия, технологический метод.

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

FEATURES OF STRUCTURING MULTI-LAYERED FUNCTIONALLY-ORIENTED COVERINGS OF BLADES OF GAS-TURBINE ENGINES

The paper analyzes the operating characteristics of the blades of a gas turbine engine. It was found that the elements of the blade wear unevenly and this significantly reduces their resource. A general approach to ensuring the properties of blades based on multilayer functionally oriented coatings is proposed. These coatings allow you to solve the problems of increasing the resource of the blades, their maintainability and repeated restoration. The article developed a technological method for the implementation of multilayer functionally oriented coating of blades. And also the necessary technological support is proposed for the formation of functionally oriented coatings of gas turbine engine blades.

Keywords: blade, gas turbine engine, properties, functionally oriented coating, multilayer coating structuring, technological method.

1. Введение

Лопатки газотурбинного двигателя (ГТД) являются одними из основных элементов авиационных двигателей [1, 2, 3]. С помощью лопаток различного назначения и элементной базы ГТД обеспечивается заданный термодинамический цикл работы авиационного двигателя, и выполняются необходимые его эксплуатационные функции. При этом следует отметить, что ГТД структурируется из множества лопаток, составляющих определенные группы (компрессор, турбина), которые обычно включают несколько тысяч лопаток различного назначения. Вместе с тем, лопатки ГТД это дорогостоящие элементы авиационного двигателя, обусловленные сложными и очень трудоемкими технологическими процессами их изготовления [3, 4, 5].

Если проанализировать особенности эксплуатации лопаток ГТД, то можно отметить, что они работают в сложных эксплуатационных условиях [1, 2, 6]. Это обусловлено целым комплексом их конструктивных и эксплуатационных параметров. Можно

отметить, что одной из главных особенностей эксплуатации лопаток является то, что на каждую лопатку, лопатки группы и между различными группами лопаток действуют по тракту ГТД неравномерные эксплуатационные функции, а именно, абразивно-эрозионный износ, температурные, химические, физические, солевые и другие воздействия. Эти воздействия приводят к неравномерному износу элементов лопаток, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга в ГТД. Это значительно снижает их ресурс, ремонтпригодность и возможность восстановления лопаток ГТД.

Для повышения ресурса лопаток ГТД применяют различные виды покрытий, в том числе и вакуумные ионно-плазменные [3]. Эти покрытия позволяют значительно повысить ресурс лопаток, однако исключить неравномерность их износа не удается из-за сложных особенностей эксплуатации лопаток. При этом износ и быстрое разрушение лопатки происходит из-за местных износов пера, который обычно начинается на входной и периферийной кромке. В этом случае, происходит быстрое разрушение основного материала пера лопатки, что ведет к значительному снижению ресурса и ремонтпригодности лопатки в целом.

Для повышения ресурса лопаток компрессора в условиях действия неравномерного их износа целесообразно обеспечить для элементов пера лопатки функционально-ориентированных свойств (ФОС) [7]. При этом ФОС целесообразно реализовывать для элементов пера каждой лопатки, для лопаток каждой группы и лопаток составляющих группы [8, 9]. ФОС лопаток ГТД повышают ресурс лопаток, их ремонтпригодность и восстанавливаемость за счет адаптации их свойств к особенностям действия неравномерного износа рабочих поверхностей пера лопатки, лопаток в группе и групп лопаток относительно друг друга.

В данной работе обеспечение ФОС лопаток ГТД выполняется на базе многослойных функционально-ориентированных покрытий (ФОП). Применение ФОП лопаток позволяет до заданного момента времени, например, назначенного ресурса ГТД, исключить износ основного тела пера лопатки в условиях действия неравномерного износа лопатки в процессе ее эксплуатации. В представленной работе ФОП реализованы на базе многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий [8, 9], имеющих специальный пространственный контур границ (ПКГ) каждого слоя. Для выполнения этих покрытий в работе разработан специальный метод их реализации [8] и необходимое технологическое обеспечение [8, 10].

Целью данной работы является обеспечение ФОС лопаток ГТД на основе многослойных ФОП, характеризуемых специальным ПКГ каждого слоя, его толщиной и количеством слоев, параметры которых определяются особенностями эксплуатации лопатки. При этом ФОП обеспечивают повышение ресурса лопаток ГТД в условиях действия переменных эксплуатационных воздействий по элементам пера каждой лопатки, по лопаткам в группе и между группами лопаток. Для формирования ФОП лопаток ГТД в работе разрабатывается технологический метод и связанный технологический процесс реализации специальных покрытий.

В соответствии с поставленной целью в данной работе предполагается решение следующих задач:

- выполнить анализ особенностей эксплуатации лопаток ГТД;
- предложить общий подход обеспечения ФОС лопаток ГТД на базе многослойных ФОП;
- разработать технологический метод реализации многослойных ФОП лопаток ГТД;

- выполнить анализ технологического обеспечения реализации ФОП лопаток ГТД.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Анализ особенностей эксплуатации лопаток ГТД.

Выполненные исследования особенностей лопаток ГТД позволили установить, что процесс их эксплуатации и износа имеет определенные особенности, а именно, рабочая поверхность каждой лопатки, каждой группы лопаток и групп лопаток изнашиваются неравномерно. Это обусловлено комплексом особенностей ГТД:

- пространственной формой лопатки и ее расположением в ГТД;
- кинематикой структурой и параметрами движений лопатки;

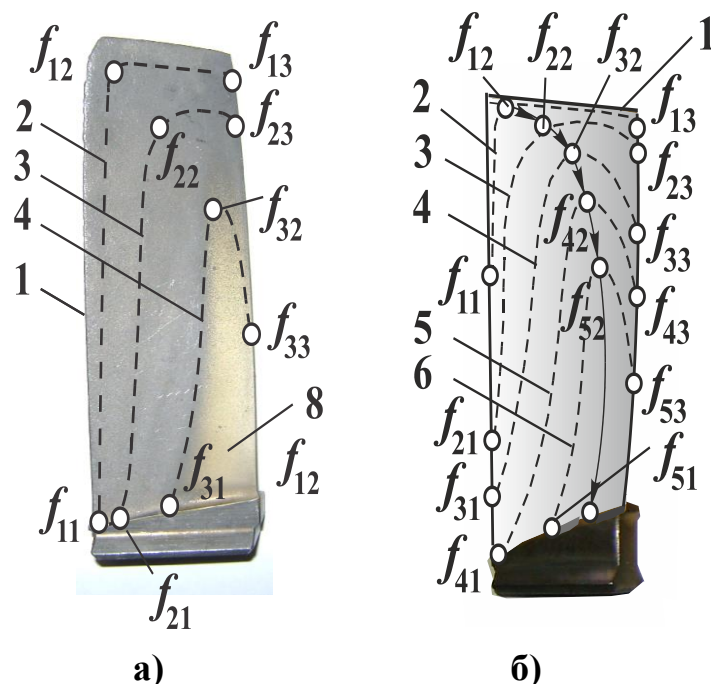


Рисунок 1. Особенности абразивно-эрозионного износа покрытия рабочих лопаток компрессора, координируемых ПКГ износа: а – износ координируется 3-мя ПКГ; б – износ координируется 5-ю ПКГ

износа покрытия рабочих лопаток компрессора. На рисунке 1 буквами показаны ПКГ износа покрытия, например: f_{11}, f_{12}, f_{13} – 1-й ПКГ износа покрытия лопатки компрессора и так далее (рисунок 1, а). Цифры обозначают следующее: 1 – рабочая лопатка компрессора, 2, 3, 4, 5, 6 – ПКГ износа лопаток.

Следует отметить, что для других групп лопаток компрессора ГТД абразивно-эрозионный износ лопаток имеет свои отличительные особенности. На рисунке 2 представлен ПКГ износа покрытия лопатки направляющего аппарата (НА) статора компрессора ГТД модели ТВ3-117.

Проведенные исследования особенностей изнашивания лопаток ГТД, а именно компрессора и турбины, имеют свои определенные особенности, которые характеризуются возникновением ПКГ. Этот ПКГ имеет свои определенные особенности.

- пространственной формой и особенностями газовой воздушного тракта ГТД;
- параметрами термогазодинамического потока ГТД;
- составом абразивно-эрозионной среды потока;
- физическими, химическими и другими составляющими потока среды в ГТД.

На рисунке 1 представлены основные особенности абразивно-эрозионного износа покрытия рабочих лопаток компрессора [6, 7], координируемых пространственным контуром границ (ПКГ) износа. Здесь показано следующее: рисунок 1, а – износ координируется 3-мя ПКГ; рисунок 1, б – износ координируется 5-ю ПКГ. Выполняя анализ особенностей износа покрытия пера лопатки, можно отметить, что износ покрытия характеризуется формированием ПКГ



Рисунок 2. ПКГ износа покрытия лопатки НА статора компрессора

В работе параметры ПКГ определялись через равные промежутки времени. Для определения параметров ПКГ лопатки на нее наносилось опытное нитрид титановое покрытие равной толщины. Измерение геометрических параметров ПКГ изнашиваемого покрытия выполнялись через равные промежутки времени. Количество этих промежутков времени определяются в соответствии со следующим выражением:

$$n = \frac{T_0}{t_i}; \quad (1)$$

где n – количество равных промежутков времени, которое соответствует числу слоев многослойного ФОП;

T_0 – длительность гарантированного ресурса ГТД;

t_i – задаваемый промежуток времени определения ПКГ.

Геометрические параметры ПКГ в данной работе выполнялись в соответствии с методикой, разработанной в работе [8]. При этом количество равных промежутков времени замеров определяется в соответствии с заданным числом слоев многослойного ФОП, реализуемых равной толщины в соответствии с толщиной опытного покрытия.

3. Общий подход обеспечения ФОС лопаток ГТД на базе многослойных ФОП.

ФОП лопатки ГТД это специальное многослойное покрытие, в котором каждый слой покрытия имеет свой ПКГ и заданную его толщину, а также число его слоев находится в соответствии с особенностями эксплуатации опытного однослойного покрытия лопатки в ГТД. При этом физико-механические свойства ФОП и опытного покрытия лопаток должны иметь одинаковые параметры. Можно отметить, что ФОП ГТД обеспечивает следующее [9]:

- по сравнению с применением традиционных покрытий лопаток ГТД - ФОП обеспечивает повышение ресурса лопаток, их ремонтпригодности и увеличения числа восстановления лопаток;

- единовременный износ всех слоев ФОП лопаток в заданный момент времени - без разрушения основного материала пера лопатки лопаток в условиях неравномерного действия эксплуатационных воздействий по элементам пера лопатки, что позволяет решать вопросы управления ресурсом лопаток;

- обеспечивать равный, кратный или функционально-зависимый ресурс групп лопаток в условиях неравномерного действия эксплуатационных воздействий по тракту ГТД;

- обеспечивается возможность управлять ресурсом лопаток и ФОП в зависимости от величины назначенного ресурса лопаток ГТД;

- обеспечивают адаптацию лопатки к особенностям ее эксплуатации в зависимости от действия переменных эксплуатационных функций на перо лопатки, на лопатки группы и лопатки групп.

Следует отметить, что в ГТД лопатки сгруппированы в определенные группы [8]. При этом переменные эксплуатационные функции действуют следующим образом:

- на элементы пера каждой лопатки (рис. 1, рис. 2);

- на лопатки каждой группы;

- на лопатки между группами, например, лопатки ротора и лопатки статора, лопатки компрессора и лопатки турбины и тому подобное.

Общий подход обеспечения ФОС лопаток заключается в следующем:

1. В обеспечении ФОС лопатки на базе многослойного ФОП из условия единовременного износа всех слоев пера каждой лопатки в период назначенного ресурса ГТД.

2. В обеспечении ФОС лопаток каждой группы на базе многослойных ФОП из условия единовременного износа ФОП всех лопаток группы в период назначенного ресурса ГТД.

3. В обеспечении ФОС групп лопаток на базе многослойных ФОП из условия единовременного износа ФОП на лопатках всех групп в период назначенного ресурса ГТД.

Предлагаемый общий подход в реализации ФОП позволяет исключать изнашивание основного материала пера лопатки в период назначенного ресурса ГТД. При этом обеспечивается одинаковый ресурс всех лопаток ГТД, что позволяет решать вопросы повышения ресурса, ремонтпригодности лопаток и увеличения числа восстановлений их работоспособности.

Основные и управляемые параметры ФОП лопаток являются следующие:

- ПКГ каждого слоя покрытия,
- толщина покрытия каждого слоя покрытия:
- количество слоев покрытия,
- физико-механические свойства покрытия каждого слоя.

Можно отметить, что ФОП лопаток компрессора реализуются на базе следующих принципов выполнения функционально-ориентированных технологий [6]:

1. Функционального соответствия особенностей действия элементарной функции в каждом функциональном элементе изделия, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств в этом функциональном элементе лопатки (обеспечение ФОС ФОП).

2. Топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента лопатки, в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам зонального элемента реализации технологических воздействий на лопатку и геометрических параметров зонного элемента обеспечения необходимых свойств лопатки (обеспечение заданных геометрических параметров ПКГ каждого слоя).

3. Количественного соответствия множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах лопатки (обеспечение заданного количества слоев многослойного ФОП).

Рассмотрим более детально приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств ФОП.

Можно отметить, что на основании первого принципа обеспечивается функциональное соответствие особенностей действия элементарной эксплуатационной функции (например, абразивно-эрозионный износ) на перо лопатки, характеристик реализации технологических воздействий и параметров обеспечения необходимых свойств. Этот принцип отвечает на вопрос: какое технологическое воздействие или свойство изделия нужно выполнить или обеспечить в зависимости от особенностей действия эксплуатационной функции? То есть он обеспечивает заданное свойство пера лопатки. Поэтому

первый принцип ориентации технологических воздействий и ФОС ФОП в соответствии с действующей функцией можно математически представить следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} : F &\rightarrow TB ; \\ \varphi_{12} : TB &\rightarrow C ; \\ \varphi_{13} : C &\rightarrow F , \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где φ_{11} - отображение (преобразование) эксплуатационной функции F покрытия лопатки в технологические воздействия TB ;

φ_{12} - отображение (преобразование) технологических воздействий TB в свойства C покрытия лопатки;

φ_{13} - отображение (преобразование) свойств C в технологические воздействия TB .

Следует иметь в виду, что представленная система отображений (2) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

Также можно отметить, что соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, первый принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие параметров ориентации технологических воздействий и свойств. Например, равный или кратный равному ресурсу покрытия.

На базе второго принципа реализуется выполнение топологического соответствия геометрических параметров функционального элемента лопатки (ПКГ), в котором действует элементарная функция при эксплуатации, геометрическим параметрам элемента реализации технологических воздействий потоков материи, энергии и информации на лопатку и геометрических параметров ПКГ элемента обеспечения необходимых свойств за счет заданной технологии. Этот принцип, в полной мере, дает ответы на вопросы: куда нужно наносить покрытие, его каждый слой, и какие геометрические параметры ПКГ каждого слоя необходимо обеспечивать. А также, куда необходимо реализовывать технологические воздействия и где обеспечивать необходимые свойства изделия? То есть, какие параметры ПКГ каждого слоя ФОП лопатки необходимо обеспечивать и где располагать этот слой покрытия. При этом второй принцип ориентации можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{21} : G(F) &\rightarrow G(TB) ; \\ \varphi_{22} : G(TB) &\rightarrow G(C) ; \\ \varphi_{23} : G(C) &\rightarrow G(F) , \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где φ_{21} - отображение (преобразование) геометрических параметров ПКГ зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ лопатки в геометрические параметры ПКГ зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$;

φ_{22} - отображение (преобразование) геометрических параметров ПКГ зоны реализации технологических воздействий $G(TB)$ в геометрические параметры ПКГ зоны обеспечения свойств $G(C)$ лопатки;

φ_{23} - отображение (преобразование) геометрических параметров ПКГ зоны обеспечения свойств $G(C)$ в геометрические параметры ПКГ зоны действия эксплуатационной функции $G(F)$ лопатки.

Здесь также следует иметь в виду, что представленная система отображений (3) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

А также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, второй принцип может обеспечивать полное или частичное соответствие геометрических параметров ориентации технологических воздействий и свойств.

Третий принцип ориентации обеспечивает количественное соответствие множества функциональных элементов, в которых действует множество различных элементарных функций при эксплуатации, множеству реализации технологических воздействий и множеству элементов обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах лопатки. Этот принцип дает ответ на вопрос: сколько видов, типов или вариантов технологических воздействий (слоев многослойного ФОП) нужно реализовать на изделие (лопатку) в процессе его изготовления и при этом обеспечить множество свойств? Третий принцип ориентации технологических воздействий и свойств ФОП лопатки в зависимости от действующих эксплуатационных функций можно описать следующими тремя отображениями (преобразованиями):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{31} : M(F) &\rightarrow M(TB); \\ \varphi_{32} : M(TB) &\rightarrow M(C); \\ \varphi_{33} : M(C) &\rightarrow M(F), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где φ_{31} - отображение (преобразование) множества зон действия эксплуатационной функции $M(F)$ лопатки в множество зон реализации технологических воздействий $M(TB)$;

φ_{32} - отображение (преобразование) множества зон реализации технологических воздействий $M(TB)$ в множество зон обеспечения свойств $M(C)$ лопатки;

φ_{33} - отображение (преобразование) множества зон обеспечения свойств $M(C)$ в множество зон действия эксплуатационной функции $M(F)$ лопатки.

В этом случае также следует иметь в виду, что представленная система отображений (3) имеет замкнутую форму, поэтому решение этих уравнений может быть выполнено на основании итерационных методов последовательного приближения с использованием множества рекуррентных циклов.

При этом также можно отметить, что в данном случае соответствие может быть изоморфным или гомоморфным. В связи с этим, третий принцип может обеспечивать полное или частичное количественное соответствие множеств параметров ориентации технологических воздействий и свойств, а именно количество слоев ФОП.

Приведенные принципы ориентации технологических воздействий и свойств изделий дают технологам ключ для научно обоснованного обеспечения заданного, требу-

емого или предельного потенциала возможностей лопаток с ФОП при эксплуатации в ГТД.

Таким образом, приведенные принципы дают возможность решать вопросы полной ориентации технологических воздействий и свойств ФОП при реализации функционально-ориентированных технологий в зависимости от особенностей эксплуатации лопаток компрессора.

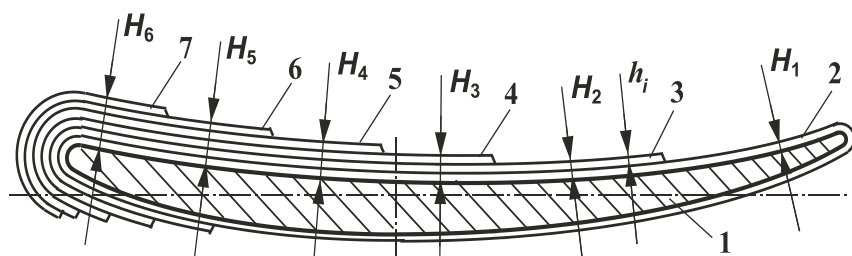


Рисунок 3. Поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из 6-ти слоев постоянной толщины

На рисунке 3 представлено поперечное сечение пера лопатки с многослойным ФОП переменной толщины, сформированным из 6-ти слоев постоянной толщины [7, 8]. Здесь показано, что ФОП для лопатки формируется из слоев одинаковой толщины h_i . В этом случае, за

счет слоев, имеющих свой ПКГ, формируется ФОП переменной толщины $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$, которое реализуется в зависимости от особенностей действия абразивно-эрозионного износа. А также на рисунке 3 показаны следующие позиции: 1 – поперечное сечение пера лопатки, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – слои нитрид титанового покрытия одинаковой толщины h_i . Каждый слой данного покрытия имеет свой ПКГ, образованный с помощью специальных экранов.

В качестве примера на рисунке 4 показан общий вид лопатки 1-й ступени компрессора с последовательно напыленным четырехслойным ФОП (нитрид титановое по-

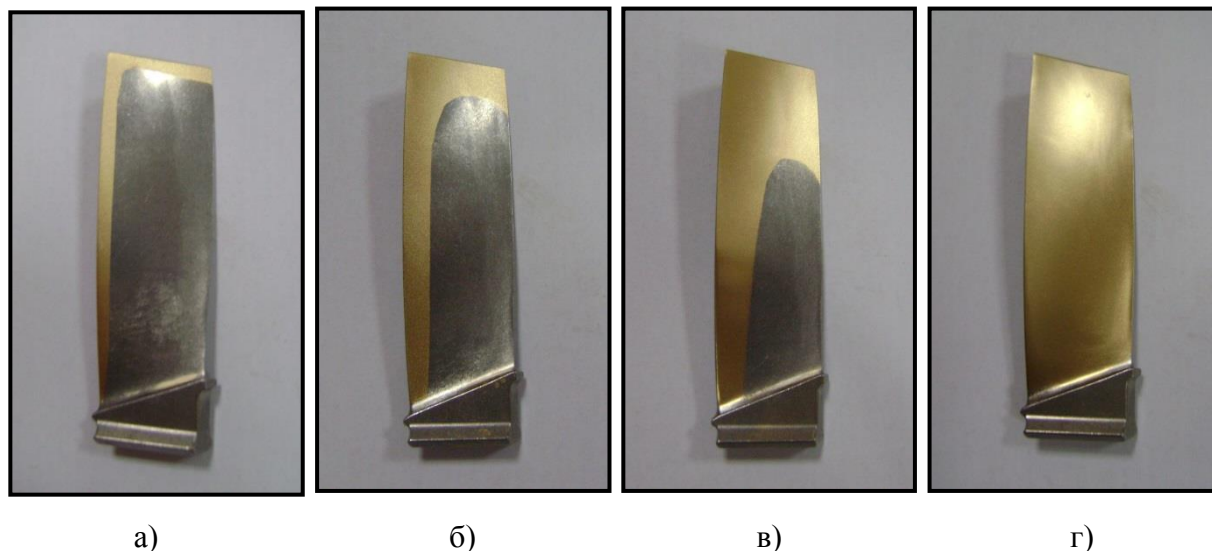


Рисунок 4. Общий вид лопатки 1-й ступени компрессора с последовательно напыленным четырехслойным ФОП (нитрид титановое): а – с одним слоем, б – с двумя слоями, в – с тремя слоями, г – с четырьмя слоями

крытие). Здесь представлено: на рисунке 4а показана лопатка с одним слоем покрытия;

на рисунке 4б – с двумя слоями покрытий; на рисунке 4в – с тремя слоями покрытий; на рисунке 4г – с четырьмя слоями покрытий.

При напылении четырехслойного ФОП их параметры определялись в соответствии с разработанным технологическим методом реализации ФОП лопаток. При этом каждый раз перед напылением покрытия выполнялись операции полирования и ультразвуковой очистки поверхностей лопаток компрессора.

4. Технологический метод реализации многослойных ФОП лопаток ГТД.

Технологический процесс напыления ФОП лопаток компрессора выполняется путем последовательного нанесения отдельных слоев покрытия (рисунок 3), каждый из которых имеет заданный ПКГ, толщину и физико-механические свойства, обеспечивающие необходимую интенсивность износа покрытия. При этом формируется такое покрытие, которое на завершающем моменте гарантированного ресурса лопатки компрессора полностью изнашивается. Причем повышение ресурса и его регулировку для группы лопаток ступени и групп лопаток относительно друг друга из условия равенства ресурса всех лопаток компрессора можно выполнять за счет изменения толщины каждого слоя ФОП. В этом случае, на заключительном этапе гарантированного ресурса покрытия лопаток, оно полностью изнашивается с поверхности пера лопатки, а основной материал пера лопатки в зонах предельного действия износа - не изнашивается. Это сохраняет лопатку в целом и позволяет многократно ее восстанавливать за счет многократного напыления ФОП [7, 8].

Разработанный технологический метод формирования ФОП базируется на процессе нанесения покрытия постоянной толщины (рисунок 3) на перо лопатки при помощи зонального защитного экрана. В этом случае, покрытие формируется многослойным переменной толщины из слоев постоянной толщины с различными топографическими параметрами ПКГ каждого слоя, которые наносятся с использованием нескольких зональных защитных экранов, пространственный контур границ каждого, из которых определяется по результатам абразивно-эрозионного износа однослойного опытного покрытия постоянной толщины на лопатке в условиях эксплуатации, при котором топографические параметры ПКГ не износившейся части опытного покрытия на поверхности пера лопатки последовательно отображаются через равные промежутки времени на различные зональные защитные экраны и реализуются на каждом из них свои ПКГ за весь период ресурса опытного покрытия, причем в процессе нанесения каждого слоя покрытия зональные защитные экраны с отображенными ПКГ устанавливаются на лопатку в обратной последовательности относительно последовательности измерений топографических параметров отображений ПКГ износа опытного покрытия, а толщина каждого наносимого слоя многослойного покрытия определяется толщиной опытного покрытия, при этом первый слой покрытия наносится без зонального защитного экрана.

А также в соответствии предлагаемым технологическим методом, толщина любого наносимого слоя многослойного покрытия (рисунок 3) может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения длительности промежутка времени между измерениями топографических параметров отображений ПКГ износа опытного покрытия на зональные защитные экраны.

При этом толщина любого наносимого слоя многослойного покрытия (рис. 4) может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения параметров его стойкости [7, 8].

Кроме того, в процессе нанесения многослойного покрытия (рис. 5), зональные защитные экраны устанавливаются на лопатку в соответствии с последовательностью

измерений топографических параметров отображений ПКГ износа опытного покрытия, в этом случае последний слой покрытия наносится без зонального защитного экрана [7, 8].

Процесс нанесения ФОП выполняется в три этапа.

Сначала, на первом этапе (рисунок 5), предварительно производится испытание в условиях эксплуатации газотурбинного двигателя опытного однослойного покрытия 8 постоянной толщины на пера лопатки 1, имеющего физико-механические свойства и свою толщину h_i , одинаковые с наносимым ФОП каждого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7. При этом выполняются замеры топографических параметров ПКГ 9, 10, 11, 12, 13 не износившейся части опытного покрытия на поверхности пера лопатки, которые показаны на рисунке 5 точками $f_{11} f_{12} f_{13}$, $f_{21} f_{22} f_{23}$, $f_{31} f_{32} f_{33}$, $f_{41} f_{42} f_{43}$, $f_{51} f_{52} f_{53}$, через равные промежутки времени за весь период ресурса этого покрытия при эксплуатации газотурбинного двигателя заданной модели [7, 8].

Затем, на втором этапе (рисунок 5), выполняется отображение топографических параметров ПКГ износа 9, 10, 11, 12, 13 на различные зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18, соответственно. При этом реализуются на каждом из них свои ПКГ $t_{11} t_{12} t_{13}$, $t_{21} t_{22} t_{23}$, $t_{31} t_{32} t_{33}$, $t_{41} t_{42} t_{43}$, $t_{51} t_{52} t_{53}$, за весь период ресурса опытного покрытия 8 [7, 8].

Далее, на третьем этапе (рис. 5), выполняется последовательный процесс нанесения каждого слоя покрытий. При этом первое покрытие 19 на пера лопатки наносится без зонального защитного экрана, а покрытия 20, 21, 22, 23, 24 выполняются с зональными защитными экранами, на которых отображены ПКГ. В этом случае, зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18, устанавливаются на лопатку 1 в обратной последовательности относительно последовательности измерений топографических параметров отображений ПКГ износа 9, 10, 11, 12, 13 опытного покрытия, а толщина каждого наносимого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7 многослойного покрытия определяется толщиной опытного покрытия 8. Поэтому на пера лопатки 1 получают многослойное ФОП переменной толщины из слоев постоянной толщины 2, 3, 4, 5, 6, 7 (рис. 5) с различными топографическими параметрами ПКГ каждого слоя, а именно $a b c d$ (1-й слой), $a b c s_{23} s_{22} s_{21} a$, (2-й слой), $s_{31} b c s_{33} s_{32} s_{31}$ (3-й слой), $s_{41} b c s_{43} s_{42} s_{41}$ (4-й слой), $s_{51} b c s_{53} s_{52} s_{51}$ (5-й слой), $s_{61} b c s_{63} s_{62} s_{61}$ (6-й слой), зависящими от особенностей эксплуатации лопатки в ГТД [7, 8].

В процессе нанесения покрытия, толщина h_i (рис. 3) любого наносимого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7 многослойного покрытия может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения длительности промежутка времени между измерениями топографических параметров отображений 9, 10, 11, 12, 13 ПКГ износа опытного покрытия 8 на зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18 [7, 8].

А также, толщина h_i (рис. 3) любого наносимого слоя 2, 3, 4, 5, 6, 7 многослойного покрытия может пропорционально изменяться в зависимости от величины изменения параметров его стойкости, например, в зависимости от изменения параметров микротвердости [7, 8].

Кроме того, в процессе нанесения многослойного покрытия, зональные защитные экраны 14, 15, 16, 17, 18 (рис.5) устанавливаются на лопатку 1 в соответствии с последовательностью измерений топографических параметров отображений ПКГ износа опытного покрытия 8, в этом случае последний слой покрытия наносится без зонального защитного экрана [7, 8].

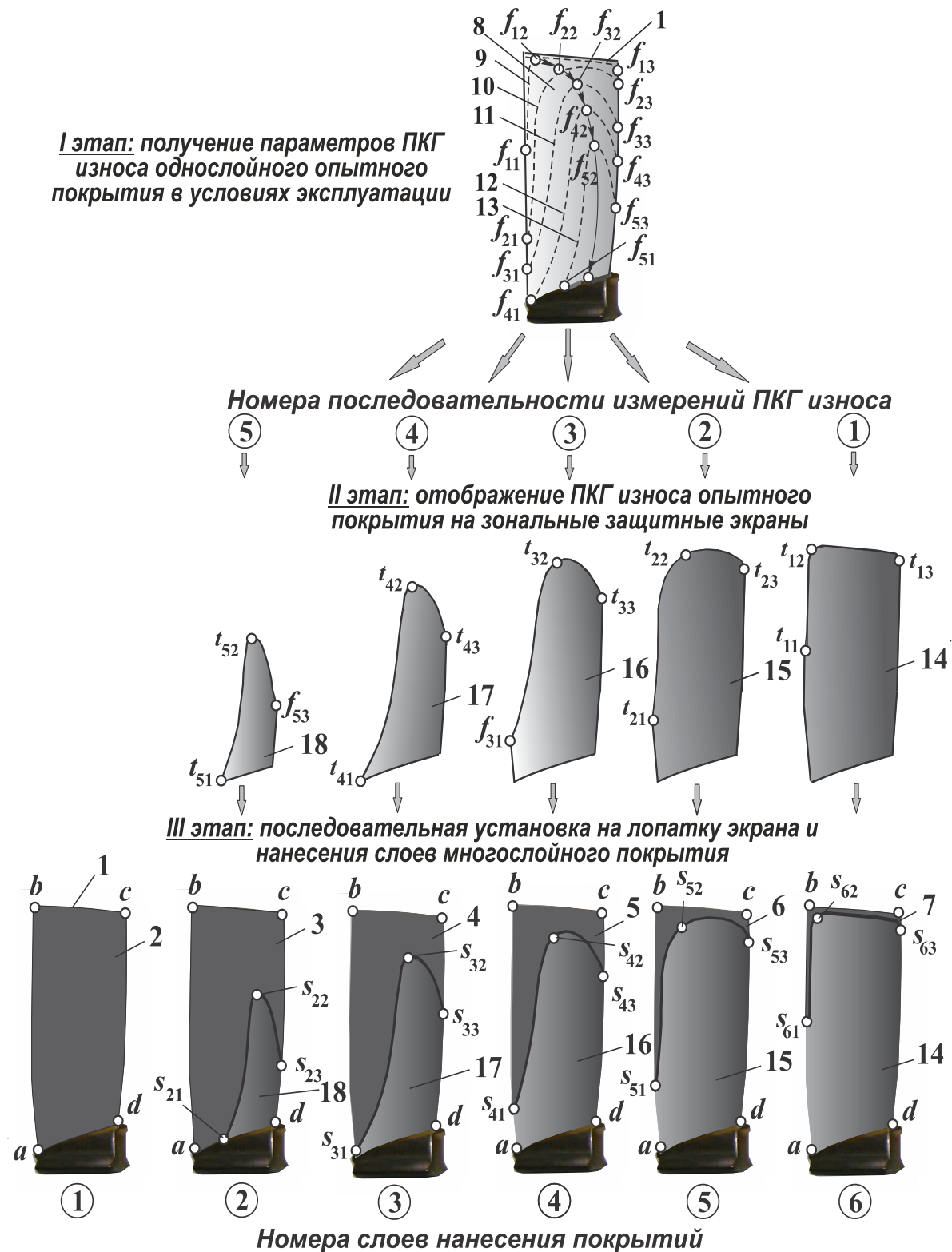


Рисунок 5. Основные этапы выполнения способа реализации многослойного ФОП рабочих лопаток компрессора

Многослойное ФОП лопатки ГТД, работающей в условиях действия неравномерного абразивно-эрозионного износа, полностью исключает разрушение тела пера лопатки в период эксплуатации, повышает общий ресурс, межремонтный ресурс лопатки и количество восстановлений лопатки посредством этих покрытий при ремонтах. Кроме того, ФОП лопатки имеет способность полностью разрушаться в заданный период времени, что исключает процесс его удаления в процессе ремонта лопатки с последующим нанесением нового покрытия [7, 8].

Таким образом, выполненные исследования позволили разработать технологический метод напыления многослойного ФОП лопаток компрессора в структуре связанного технологического процесса обработки групп лопаток. Этот метод позволяет напылять ФОП, которое обеспечивает возможность повышения ресурса и ремонтпригодности каждой лопатки за счет реализации принципа единовременного износа покрытия в период гарантированного ресурса лопаток компрессора, а также выравнивания ресурса лопаток в каждой группе и выравнивания ресурса групп лопаток относительно друг друга в ГТД.

5. Технологическое обеспечение реализации ФОП лопаток ГТД.

Для реализации многослойных ФОП необходима разработка технологического обеспечения и необходимых процессов. Эти вопросы решены в работах [8, 11]

Учитывая, что ресурс лопатки должен быть одинаков можно записать следующее выражение:

$$\sum_{s_1=1}^{S_1} \frac{h_{1s_1}}{\mu_{1s_1}} = \sum_{s_2=1}^{S_2} \frac{h_{2s_2}}{\mu_{2s_2}} = \sum_{s_3=1}^{S_3} \frac{h_{3s_3}}{\mu_{3s_3}} = \dots = \sum_{s_k=1}^{S_k} \frac{h_{ks_k}}{\mu_{ks_k}} = \dots = \sum_{s_K=1}^{S_K} \frac{h_{Ks_K}}{\mu_{Ks_K}}; \quad (5)$$

где h_{ks_k} - толщина s_k -го слоя ФОП k -й лопатки компрессора;

μ_{ks_k} - интенсивность абразивно-эрозионного износа s_k -го слоя ФОП k -й лопатки компрессора;

S_k - количество слоев ФОП k -й лопатки компрессора;

K - общее количество лопаток компрессора.

При нанесении ФОП толщина и интенсивность износа каждого слоя покрытия лопаток компрессора выполняется обычно одинаковой. С учетом этого, выражение (5) можно представить следующим образом

$$\frac{S_1 h_1}{\mu_1} = \frac{S_2 h_2}{\mu_2} = \frac{S_3 h_3}{\mu_3} = \dots = \frac{S_k h_k}{\mu_k} = \dots = \frac{S_K h_K}{\mu_K}. \quad (6)$$

где h_k и μ_k - толщина и интенсивность износа одного любого слоя ФОП, соответственно.

На основании выражения (6) устанавливаются связи между основными параметрами соседних лопаток групп или всех лопаток компрессора. Эти связи необходимы при формировании структуры комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения ФОП лопаток. Данная структура технологии обусловлена многослойным ФОП. В этом случае, закономерности связей параметров ФОП определяются на основании следующих выражений [8, 11]:

$$\left. \begin{aligned}
 h_1 &= \frac{T_o \mu_1}{S_1}; \\
 h_2 &= \frac{S_1 h_1 \mu_2}{S_2 \mu_1}; \\
 h_3 &= \frac{S_2 h_2 \mu_2}{S_3 \mu_1}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 h_k &= \frac{S_{(k-1)} h_{(k-1)} \mu_k}{S_k \mu_{(k-1)}}; \\
 &\dots\dots\dots; \\
 h_K &= \frac{S_{(K-1)} h_{(K-1)} \mu_K}{S_K \mu_{(K-1)}}.
 \end{aligned} \right\} (7)$$

С помощью выражения (7) определяются связи параметров покрытий лопаток при нанесении многослойного ФОП с одинаковой толщиной слоев покрытия. При этом каждый слой ФОП формируется со своим специальным ПКГ.

На базе параметров связи (7) строится многосвязный технологический процесс реализации ФОП лопаток ГТД [8, 11].

6. Заключение

Таким образом, в представленной работе решены вопросы обеспечения ФОС лопаток ГТД на основе многослойных ФОП со специальным ПКГ каждого слоя, обеспечивающих повышение их ресурса в условиях действия переменных эксплуатационных воздействий по элементам пера лопатки. При этом разработан новый технологический метод реализации многослойных ФОП, который выполняется в соответствии с заданным алгоритмом, предусматривающим формирование заданного ПКГ каждого слоя, его толщину и количество слоев в соответствии с особенностями эксплуатации лопатки. Для обеспечения этого в работе решены следующие вопросы:

1. Выполнен анализ особенностей эксплуатации лопаток ГТД, при этом установлено, что на каждую лопатку, группу лопаток и между группами лопаток действуют переменные воздействия;

2. В работе предложено для повышения ресурса лопаток и их ремонтпригодности (за счет многократного их восстановления) обеспечивать ФОС лопаток на базе ФОП. Для выполнения этого разработан общий подход, основывающийся на особых принципах реализации многослойных ФОП, включающий реализацию:

- ПКГ каждого слоя покрытия;
- определение толщины каждого слоя покрытия;
- определение количества необходимых слоев покрытий.

Эти составляющие позволяют решить вопросы единовременного износа всего покрытия в заданный момент времени, например, за длительность назначенного ресурса ГТД.

3. Для формирования ФОП лопаток в работе разработан необходимый алгоритм формирования покрытий лопаток.

4. Для реализации предлагаемых покрытий лопаток разработано необходимое технологическое обеспечение, базирующееся на особенностях синтеза связанных технологических процессов формирования многослойного ФОП лопаток ГТД [8, 11].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев, В. А. Зрелов, Ю. М. Игнаткин и [др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. Богуслаев, В. А. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. / В. А. Богуслаев, В. К. Яценко, П. Д. Жеманюк и [др.]. – Запорожье: Мотор Сич, 2005. – 559 с.
4. Авиаинформ // Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2019. – Вып. № 12 (189). – 132 с.
5. Авиаинформ // Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2020. – Вып. № 2 (191). – 140 с.
6. Михайлов, Д. А. Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций / Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4 (50). С. 126 - 131.
7. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
8. Михайлов, В. А. Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – 18 с.
9. Михайлов, Д. А. Общий подход в обеспечении функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора ГТД на базе принципа одновременного полного износа покрытия / Д. А. Михайлов, А. В. Хандожко, Е. А. Шейко, А. Н. Михайлов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 4 (50). – С. 132 - 139.
10. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированных покрытий. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – 22 с.
11. Михайлов, А. Н. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. – № 1 (103). – С. 40-48. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-2020-1-40-48>

Поступила в редколлегию 20.02.2020 г.

УДК 621.83

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

Донецкий национальный технический университет, ДНР

Тел: +7(964) 7045362; E-mail: validarkotlarov@mail.ru

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ НОВОЙ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ КПП С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПЕРЕДАЧ БЕЗ РАЗРЫВА ПОТОКА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ

В статье приведены сведения о большом классе механизмов, под обобщенным названием «Коробки переключения передач» (КПП), предназначенных для изменения чисел оборотов выходных валов в различных машинах общей сферы машиностроения. Указан один из возможных путей повышения эффективности работы и расширения возможностей самих КПП, основанный на разработке конструктивных особенностей, позволяющих переключать передачи без разрыва потока передаваемой мощности, и возможности использования технологических воздействий при изготовлении, обеспечивающих достижение заданных функционально-параметрических показателей, вновь проектируемых КПП.

Ключевые слова: технологические машины, транспортные машины, коробки переключения передач, поток передаваемой мощности, классификация КПП, технологии.

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

BACKGROUND OF CREATING A NEW SCHEME OF A MECHANICAL GEARED GEAR WITH TRANSMISSION SWITCH WITHOUT A BREAK OF THE TRANSMISSION FLOW POWER

The article provides information about a large class of mechanisms, under the general name "Gearboxes" (PPC), designed to change the speed of the output shafts in various machines in the general field of engineering. One of the possible ways to increase the work efficiency and expand the capabilities of the gearbox itself is indicated, based on the development of design features that allow shifting gears without breaking the sweat of the transmitted power, and the possibility of using technological influences in the manufacture, ensuring the achievement of specified functional and parametric indicators of the newly designed gearboxes.

Keywords: technological machines, transport machines, gearboxes, transmitted power flow, gearbox classification, technologies.

1. Введение

В современных машинах и механизмах, применяемых в различных областях народного хозяйства, широко используются зубчатые передачи, предназначенные для передачи крутящих моментов и выполнения эксплуатационных функций [1, 2, 3]. При этом большинство машин по своему функциональному назначению, условиям применения и эксплуатации требует переменных величин динамического взаимодействия с окружающей средой и объектами взаимодействия в процессе работы. Например, в подъемных кранах необходимо изменять скорость в процессе подъема и перемещения грузов; в горнорудной промышленности необходимо изменять скорость и силу во время воздействия рабочих органов на породу; при просеивании дисперсных веществ необходимо изменять скорость перемещения сырья в процессе классификации; при бурении скважин необходимо изменять скорость вращения буров в зависимости от вида и плотности проходимых слоев именно в момент прохода пород; в транспортных машинах зачастую необходимо изменять скорость движения без прерывания передачи крутящего момента (на ведущие органы) относительно среды (дороги, грунта, воды, турбулентности воздуха); работа различных насосов при перекачивании жидкостей и

пульпы с различными удельными плотностями также требует изменения скорости подачи рабочего тела при разных условиях эксплуатации [4, 5]. При этом некоторые процессы требуют изменять скорость выходного звена без прерывания потока передаваемой мощности с исключением возможного проскальзывания.

Целью данной работы является расширение эксплуатационных возможностей коробки переключения передач (КПП) на основе создания новых схем механического переключения зубчатых колес, которые исключают разрыв передаваемого потока мощности и крутящего момента в зацеплении, а также анализ конструкторско-технологических решений их изготовления.

Из анализа характера работы машин и механизмов вытекает несколько задач, требующих технологического решения при создании КПП без разрыва потока передаваемой мощности для различных технологических и транспортных машин, и которые можно сформулировать следующим образом.

Задачи, решаемые в настоящей работе.

1. Подтверждение необходимости и актуальности разработки зубчатой механической коробки переключения передач без разрыва потока передаваемой мощности.

2. Разработка схемы механической зубчатой КПП с возможностью переключения передач без разрыва потока передаваемой мощности и крутящего момента на рабочие органы с исключением сил трения в процессе перемены передачи.

3. Установление взаимосвязей между конструктивно-функциональными параметрами деталей разрабатываемой КПП, и функционально-ориентированными возможностями технологического воздействия на детали при их изготовлении на всей последовательности операций на конкретном предприятии.

2. Основное содержание и результаты работы

Поставленные задачи решаются последовательно путем выявления места новой КПП в машинах на уровне узлов и механизмов при выполнении машинами производственных задач; определения и разработки схемы КПП с таким соотношением конструктивно-технологических параметров, которое обеспечивает переключение передач без разрыва потока передаваемой мощности, исключив при этом силы трения в процессе переключения; нахождения соответствия между структурно значимыми элементами деталей КПП и технологическими воздействиями для обеспечения установленных конструкторскими документами требований. Для установления функционально значимых структурных элементов деталей КПП выполнен структурный анализ механизма в иерархии всех машин.

Основываясь на исследовании и анализе выполняемых технологическими и транспортными машинами операций и действий в процессе производственной деятельности, выявляются процессы, для которых существующие средства передачи мощности не являются достаточными. Во многих случаях для машин требуются трансмиссии, обеспечивающие смену числа оборотов выходного вала без разрыва потока передаваемой мощности.

В общем парке машин имеется множество объектов машиностроения, включающих любые машинные системы, комплексы и агрегаты, в составе которых есть технологические и транспортные машины, эксплуатация которых осуществляется в разных условиях. Очень часто эти условия изменяются в процессе работы и изменяют характер взаимодействия рабочих органов машин с объектами труда и окружающей средой. Заранее эти условия не всегда могут определяться, поэтому в процессе работы необходимо изменять энергетическое и динамическое взаимодействие рабочих органов с объек-

тами обработки. Так, например, при разработке природных ископаемых горный комбайн может перейти из зоны работы с более мягкими породами в зону с твердыми или вязкими материалами. Тогда необходимо изменять скорость взаимодействия инструмента с породами и силу давления инструментов на породу, что требует включения гибкой реакции трансмиссии машины, переключения чисел оборотов выходных валов, КПП.

Свое место таких КПП в техносфере находится в области трансмиссий, как представлено на схеме обобщенной классификации машин на рис. 1.

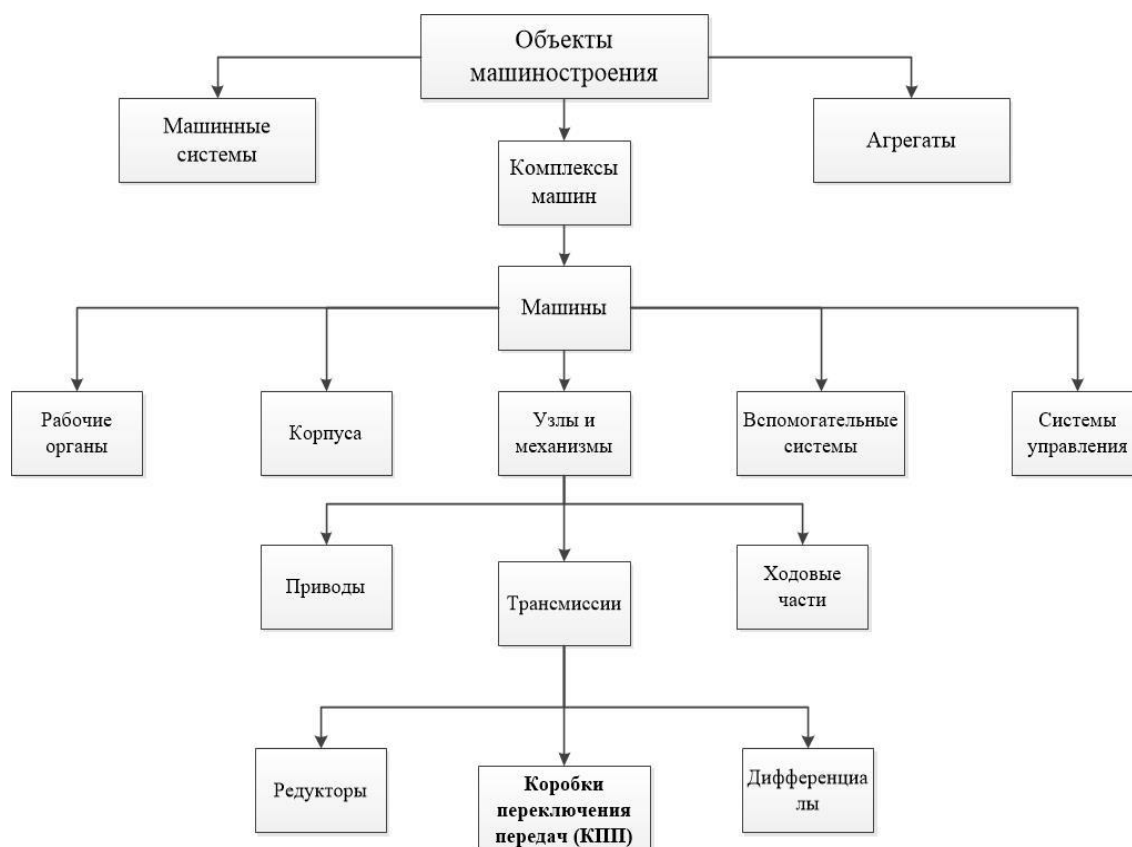


Рисунок 1. Место новой КПП без разрыва потока передаваемой мощности в иерархической последовательности классификации машин различного назначения

В настоящее время существует множество различных классификаций механизмов переключения передач, включая вариаторы, характеризуемые различными признаками и особенностями работы [1, 2].

Однако каждая из упомянутых КПП кроме своих положительных достоинств имеет и свои существенные недостатки, ограничивающие их использование в более широком диапазоне машинных систем.

Так гидравлические и электрические механизмы переключения передач в сравнении с механическими КПП по исследованию некоторых авторов обладают следующими преимуществами и недостатками:

- преимущества механических трансмиссий заключаются в обеспечении более высокого коэффициента полезного действия (КПД), компактности и малой массы, надёжности в работе, относительной простоте в производстве и эксплуатации. Недо-

статком механической трансмиссии можно считать ступенчатость изменения передаточных чисел, снижающая использование мощности двигателя;

- преимущества гидромеханических трансмиссий заключаются в возможности автоматического изменения крутящего момента в зависимости от изменения внешних сопротивлений, в возможности автоматизации переключения передач и облегчении управления, и снижении пиковых нагрузок, действующих на узлы и детали трансмиссии и двигатель, и как следствие – в повышении надежности и долговечности двигателя и трансмиссии. Основным недостатком этих трансмиссий является относительно низкий КПД механизма из-за влияния низкого КПД гидротрансформатора. Кроме того, необходимо иметь специальную систему охлаждения и подпитки гидроагрегата, приводящую к увеличению габаритов моторно-трансмиссионного отделения. Без наличия специальных фрикционов невозможно обеспечить торможение двигателем и запуск с буксира.

- достоинство гидравлических трансмиссий в возможности совершенно безударного включения передач и в отсутствии механических муфт, ненадежно работающих при передаче больших моментов (например, на тепловозах), а основной недостаток – в необходимости установки автономной достаточно громоздкой гидромуфты на каждую передачу.

- одно из главных достоинств электромеханических трансмиссий – это возможность широкого диапазона автоматического изменения крутящего момента и силы тяги, а также отсутствие жесткой кинематической связи между агрегатами электротрансмиссии, что расширяет возможности создания различных компоновочных схем КП. Большим недостатком, являются относительно большие габариты, масса, стоимость и пониженный КПД (в сравнении с механической). Однако, с развитием электротехнической промышленности, массовым распространением асинхронного, синхронного, вентильного, индукторного и др. видов электрических приводов, открываются новые возможности для электромеханических трансмиссий.



Рисунок 2. Общая классификация КПП по укрупненным признакам

Наиболее широко применяемая в технике в настоящее время классификация КПП представлена на рис. 2.

В иерархической последовательности факторов и классифицирующих признаков находится местоположение любой КПП в таблице классификации.

Место новой КПП, реализующей переключение передач без разрыва потока передаваемой мощности, в классе трансмиссий на уровне механизмов и узлов КПП показано и выделено жирным шрифтом на рис. 2

Разработанная схема КПП, обеспечивающая переключение передач без разрыва потока передаваемой мощности, позволяет исключить из схемы трансмиссии муфту сцепления и как следствие сократить время самого переключения передач.

Принципиальная схема зубчатого зацепления предложенной КПП представлена на рис. 3, на которой литерами $d_{ш}$ и d_{k1-3} обозначены с соответствующими индексами

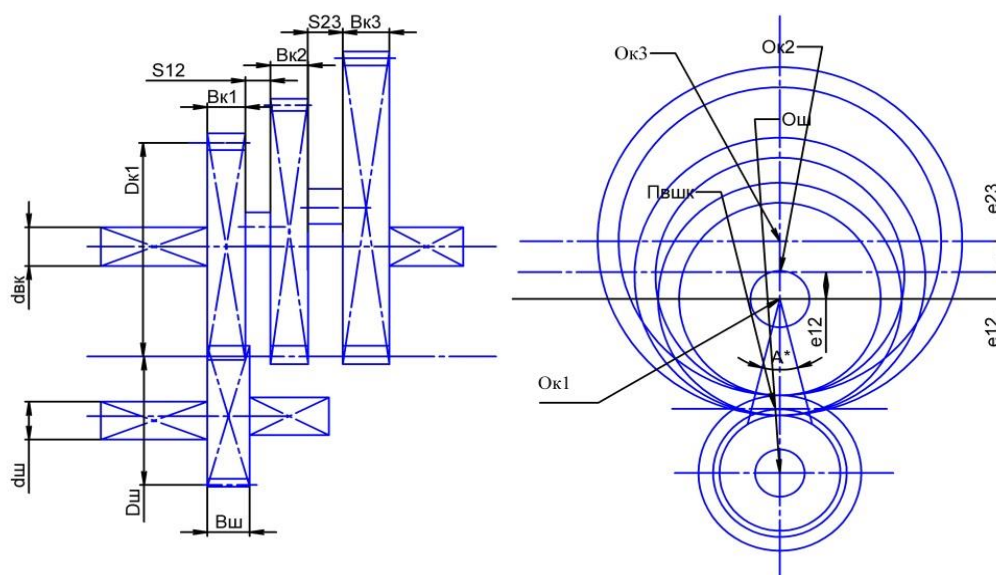


Рисунок 3. Принципиальная схема зацепления КПП без разрыва потока передаваемой мощности

диаметры валов шестерни и колес блок-вала, а литерами D с соответствующими индексами обозначены делительные диаметры зубчатых венцов. Литерами B и S с соответствующими индексами обозначены ширина венцов и расстояние между торцевыми плоскостями рядом расположенных зубчатых колес.

Литерой e_i с разным сочетанием числовых и буквенных индексов обозначены эксцентриситеты между соответствующими осями венцов зубчатых колес относительно оси вала. При этом разработана схема и проведен анализ КПП как с внешним зацеплением шестерни (рис. 3) с зубчатыми колесами блок-вала колес, так и с внутренним зацеплением колес (рис. 4) по типу планетарного механизма.

Предлагаемая схема КПП может быть в машине реализована в различных исполнениях, принимая отличительные факторы и черты из других групп классификации, например:

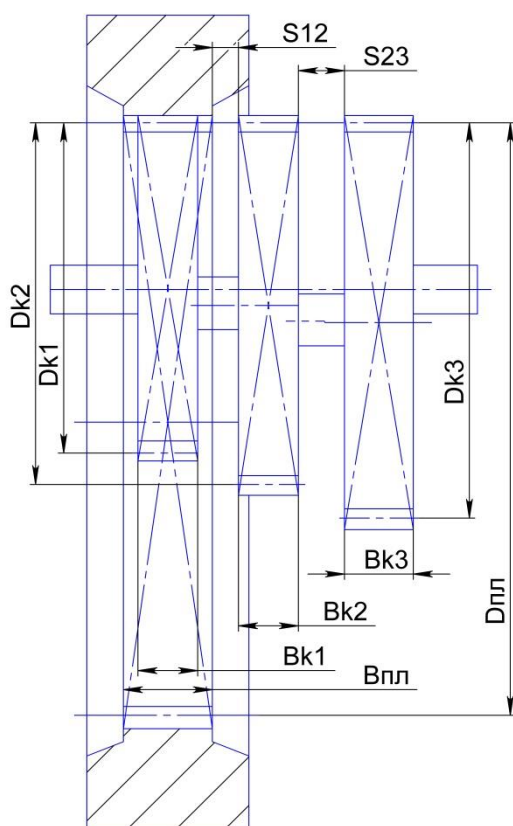


Рисунок 4. Принципиальная схема КПП без разрыва потока мощности с внутренним зацеплением

того венца шестерни и колеса: $O_{к1}$, $O_{к2}$ – оси колес блок-вала; $O_{ш}$ – ось шестерни; S_{1-2} – расстояние между ребрами зубчатых венцов колес блок-вала; $S_{ш1}$, $S_{ш2}$ – межосевое расстояние шестерни и соответствующего колеса; e_{1-2} – эксцентриситет осей колеса 1 и колеса 2 относительно общей оси блок-вала колес.

Прежде всего, следует отметить, что переключение всегда осуществляется в однозначно определенной и ограниченной угловым сегментом зоне зубчатых венцов блок-вала.

Этот сегмент определяется 3-4 зубьями колеса (в зависимости от модуля и количества зубьев), в зоне первого зуба каждого колеса блок-вала. Первый (1-ый) зуб венца каждого колеса условно считаем зуб, у которого есть общая касательная линия вершин для всех зубчатых венцов блок-вала. Тогда процесс переключения начинается в момент, зуб $(n-1)$ ый при количестве n зубьев на венце первого колеса, начинает входить в угловой сектор переключения (рис. 5, а). При количестве зубьев m на венце второго

- КПП может двух-вальной и много-вальной;
- одноступенчатой или многоступенчатой;
- включение КПП может быть ручным, полуавтоматическим или автоматическим;
- включение может быть при остановке механизма или во время движения исполнительных частей;
- исполнение механическое или гибридное, например, с электромеханическим или гидравлическим приводом механизма переключения, а также механизма изменения положения координирующих положение осей колес вспомогательных планшайб. За счет планшайб обеспечивается компенсация эксцентриситета при установке взаимного положения вал-шестерни и блок-вала в зацеплении.

Работоспособность предложенной схемы КПП можно проиллюстрировать на схеме переключения передач в различных фазах зацепления и перехода вал-шестерни с одного колеса на другое блок-вала колес, как показано на рис. 5а-5д.

На рис. 5а-5д конструктивные элементы деталей обозначены символами: $D_{ш}$ и $D_{к}$ – делительные диаметры шестерни и колеса; $B_{ш}$ и $B_{к}$ – ширина зубчатого венца шестерни и колеса;

зубчатого колеса в этом угловом секторе находится $(m-1)$ ый зуб венца. В этот момент начинает срабатывать механизм изменения положения вала-шестерни, который перемещает вал-шестерню вдоль оси вращения вала на расстояние шага расположения венцов зубчатых

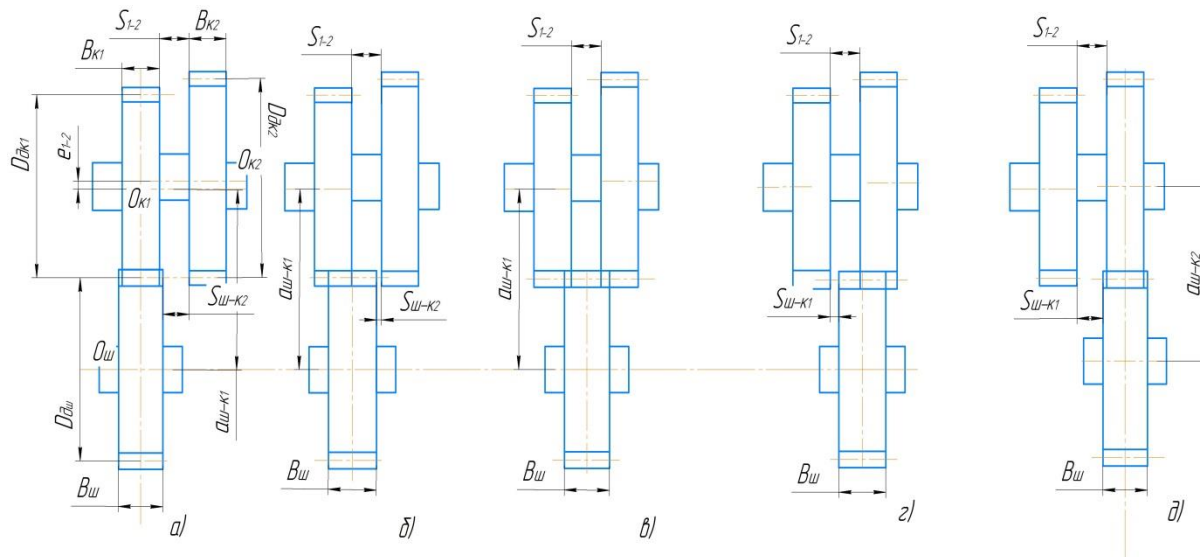


Рисунок 5. Схемы зацепления вал-шестерни с колесами блок-вала в процессе осуществления переключения передач (с начала выхода шестерни из зацепления с первым колесом и с осуществлением полноценного зацепления со вторым колесом): а, б, в, г, д – фазы зацепления зубьев

колес блок-вала. Одновременно механизм переключения перемещает оси планшайб, в которых размещены посадочные шейки блок-вала на величину эксцентриситетов осей колес для изменения межосевого расстояния $S_{у1}$ шестерни и 1-го колеса, и восстановления нового межосевого расстояния шестерни и второго (2-го) колеса S_{21} блок-вала. На рис. 5, б показана фаза начала выхода первого колеса из зацепления с шестерней, и в это время зазор между боковыми поверхностями венцов шестерни и второго колеса. На рис. 5, в показана фаза, когда в зацеплении с шестерней находятся одновременно зубчатые венцы 1-го и 2-го колес блок-вала. Это момент, когда с шестерней колеса в зацеплении находится 1-ый зуб венца 1-го колеса и 1-ый зуб венца 2-го колеса. На рис. 5, г показана фаза выхода 2-го зуба венца 1-го колеса из зацепления с шестерней с образованием зазора между боковыми поверхностями венцов 1-го колеса и шестерни, а шестерня уже находится в зацеплении только с зубьями венца 2-го колеса, и в этот момент полностью устанавливается адекватное межосевое расстояние $S_{у2}$. На рис. 5, д показана фаза окончания процесса переключения и полнопрофильного зацепления шестерни и венца 2-го колеса блока-вала.

Конструктивными ограничительными условиями реализации механизма являются соотношения размеров ширины зубчатых венцов, величины эксцентриситетов осей колес, количества зубьев венцов блок-вала колес. Обязательным условием является равенство ширины зубчатых венцов колес между собой и равенство ширины расстояния (шага расположения колес блок-вала) между торцами колес: $B_1 = B_2 = \dots B_i$, и $S_{1-2} = S_{2-3} = \dots B_{(i-1)-i}$, а также соотношение $B_i > S_{(i-1)-i}$, ширина зубчатого венца

больше шага размещения колес. Должно выдерживаться и соотношение $B_i > B_k$, т.е. ширина зубчатого венца шестерни должна быть больше ширины зубчатого венца колеса блок-вала на ΔB для обеспечения неразрывности процесса перехода шестерни из зацепления с одним колесом на другое. Расчетным конструктивным ограничением является и угловой сектор φ_{ki} зубчатых венцов колес и шестерни, в пределах которого осуществляется процесс собственно переключения передачи. Именно этот сектор венцов колес подвергается продольной и высотной модификации зубьев колес с целью облегчения процесса переключения. Параметрический угол φ_{ki} определяется установкой - угол φ_{ki} включает в свою зону 4 зуба колес: 2 зуба начиная с 1-го и два зуба: (k)-ый и ($k-1$)-ый зубья венца при наличии общего числа (k) зубьев на венце. Тогда угловая зона α_{ki} , занимаемая 4-мя зубьями колеса будет:

$$\alpha_{ki} = \frac{8\pi}{z_i}, \quad (1)$$

где z_i – количество зубьев венца рассматриваемого i -го колеса блок-вала.

Тогда быстродействие механизма переключения передач t_{ni} определится в секундах как время, необходимое для прохождения углового сектора α_{ki} i -го колеса угловой зоны от ($k-1$)-го до 2-го зуба колеса для переключения передачи. Определяется это время в секундах из выражения:

$$t_{ni} = \frac{\alpha_{ki}}{2 * 60\pi n}, \quad (2)$$

или после преобразований:

$$t_{ni} = \frac{240}{n_i z_i}, \quad (3)$$

где n_i – число оборотов i -го колеса в минуту. Это условие накладывает ограничение на максимальные обороты вращения вала при переключении, учитывающие инерционность элементов и механизмов системы переключения

$$n_{i\max} \leq \frac{240}{t_{ni} z_i}. \quad (4)$$

Исходя из быстродействия перехода шестерни из зацепления с одного колеса на другое одновременно необходимо вести синтез и расчет конструктивных элементов механизма изменения относительного положения осей эксцентриковых планшайб, компенсирующих эксцентриситет колес при переключении.

Таким образом, анализ предложенной схемы КПП показал принципиальную возможность реализации способа переключения передач без разрыва потока передаваемой мощности при соблюдении заданных ограничительных условий.

Указанные ограничительные условия привели к некоторому усложнению деталей в геометрическом отношении и в свойствах поверхностного слоя. Это ни что иное как модификация деталей, относящаяся к геометрии, поверхностным свойствам детали и свойствам внутренних зон деталей.

Такое положение приводит к необходимости решать вопросы обеспечения функциональных конструктивных параметров технологическими средствами на всех

этапах изготовления деталей, начиная от формирования заготовок до финишных операций, а также повышают технические требования к деталям [3, 4, 5], размерные соотношения их элементов по сравнению с общепринятыми зубчатыми колесами. Выбор из всех возможных вариантов оптимальных технологических воздействий с применением необходимого оборудования, оснастки и инструментов на каждой операции и переходе приводит по существу к формированию частного случая функционально ориентированной технологии, общие принципы и методология которой ранее изложены в работах [6, 7, 8].

Определение надежности КПП и ее деталей, допуска отклонений параметров передачи от заданных, наложение ограничительных условий различного рода, включая геометрические, кинематические и динамические могут прогнозироваться проведением ряда аналитических исследований:

- структурного анализа схемы;
- кинематического анализа;
- динамического анализа.

3. Основные особенности технологического обеспечения заданных свойств

Возможность изготовления коробки передач в рамках допуска на установленные документацией параметры обеспечивается установлением соответствий атрибутов $A_k \Sigma$ КПП и атрибутов a_i входящих в нее деталей комплексному показателю технологии $T_T \Sigma$ и всем технологическим атрибутам t_i на всех технологических переделах.

Показатель $A_k \Sigma$ является комплексным показателем множества подмножеств конструктивных атрибутов a_i каждой i -ой, входящей в состав КПП, а каждый a_i атрибут включает в себя множество частных атрибутов a_i^j каждой детали в иерархической последовательности, включающих j показателей и характеристик: показатели геометрии, диапазон размеров детали, требования к твердости поверхности, шероховатости, к структуре и физико-химическим показателям в различных зонах материала детали, требования к особым модифицированным зонам и участкам. Путем конкретизации принципов и характеристик, разработанных ранее [8], множество технических показателей (атрибутов) изделия представим выражением:

$$A_k \Sigma \in \{a_{ri}^1, a_{ri}^2, \dots, a_{ri}^m\} \cap \{a_{pi}^1, a_{pi}^2, \dots, a_{pi}^f\} \cap \{a_{ni}^1, a_{ni}^2, \dots, a_{ni}^g\} \cap \dots \cap \{a_{mi}^1, a_{mi}^2, \dots, a_{mi}^n\} \quad (5)$$

где: - множество $\{a_{ri}^1, a_{ri}^2, \dots, a_{ri}^m\}$ представляет собой комплекс требований i -ой детали по геометрическим признакам: наличие в детали элементов, включающих плоские поверхности, тела вращения, конуса, параллелепипеды, торы и иные особые виды тел;

- множество $\{a_{pi}^1, a_{pi}^2, \dots, a_{pi}^f\}$ указывает на размерные характеристики, включая габаритные размеры, общее количество исполнительных размеров, процентное соотношение мелких размеров (фаски, галтели и др.), процентное соотношение размеров со свободными допусками и размеров посадочных и с жесткими допусками;

- множество $\{a_{ni}^1, a_{ni}^2, \dots, a_{ni}^g\}$ включает требования ко всем поверхностям детали, такие как наличие обрабатываемых и не обрабатываемых поверхностей (в состоянии поставки) и их долевого соотношения, долевого соотношения поверхностей с различными показателями шероховатости; термообработка участков поверхности; наличие металлiza-

ции, гальванических, плазменных, электромагнитных, лазерных, электроэрозионных, плазмохимической, булатирования, нанесение карбидных слоев, ионной бомбардировки и иных видов специальной обработки поверхностей деталей;

- множество $\{a_{mi}^1, a_{mi}^2, \dots, a_{mi}^n\}$ своими показателями отражает особые требования модификации, например в вал-блоке модификация зубьев венцов колес в зоне углового сектора переключения, включая геометрическую модификацию [9] по высоте и по ширине зуба, а также модификацию поверхностного слоя по высоте и по ширине зуба.

Можно еще более подробно детализировать [10, 11] конкретные требования к деталям и получить подмножества более глубокого иерархического уровня [8], включая микроуровни и наноуровни при понимании, что будут применены технологические средства и технологические воздействия на микроуровнях и наноуровнях.

Каждое требование к детали можно обеспечить оптимальным технологическим воздействием, выбранным из некоторого подмножества возможных вариантов. Варианты различаются возможностью исполнения на различном оборудовании и технологическими средствами с различными параметрами, применяемой оснасткой, приспособлениями, инструментами, мощностью технологического воздействия и т.д.

На рис. 6 показан характер взаимосвязей конструкторско-технологических показателей деталей КПП с функционально-ориентированными технологическими воздействиями. Эта схема поясняет некоторые особенности обеспечения свойств.

Таким образом, для каждого конструктивного показателя детали можно привести в соответствие некоторое множество технологических операций или технологических воздействий t_i^j , включающих при обработке i -ой детали возможность выбора вида заготовки, оборудования для механической обработки, приспособлений, разных инструментов, способов нанесения покрытий и иных воздействий. Для i -ой детали можно множество технологических параметров представить в виде:

$$T_{i\Sigma} = \left\{ t_{i3}^d, t_{i0}^m, t_{i3}^n, t_{i\phi}^k, t_{in}^f, t_{ic}^g, t_{iu}^r, t_{inn}^q, t_{i3}^j, t_{ik}^s, t_{iy}^w \right\}, \quad (6)$$

где t_{i3}^d - выбран d -ый вариант из подмножества по способу формирования заготовки;

t_{i0}^m - m -ый вариант выбора оборудования по массовым характеристикам;

t_{i3}^n - n -ый вариант выбора способа энергетического воздействия;

$t_{i\phi}^k$ - k -ый вариант выбора способа формообразования (обработка давлением, механической обработкой, наращиванием типа 3D печати, наплавки и другие);

t_{in}^f - f -ый вариант выбора применяемых приспособлений и оснастки;

t_{ic}^g - g -ый вариант выбора станков для механической обработки, модель станка;

t_{iu}^r - r -ый вариант выбранного инструмента, включая выбор типа инструмента, характеристик режущих кромок, материала, соединительных поверхностей и др.;

t_{inn}^q - q -ый вариант способа нанесения покрытий на поверхности детали;

t_{ig}^j – j -ый вариант мощности воздействия импульса обработки, включая энергетическую

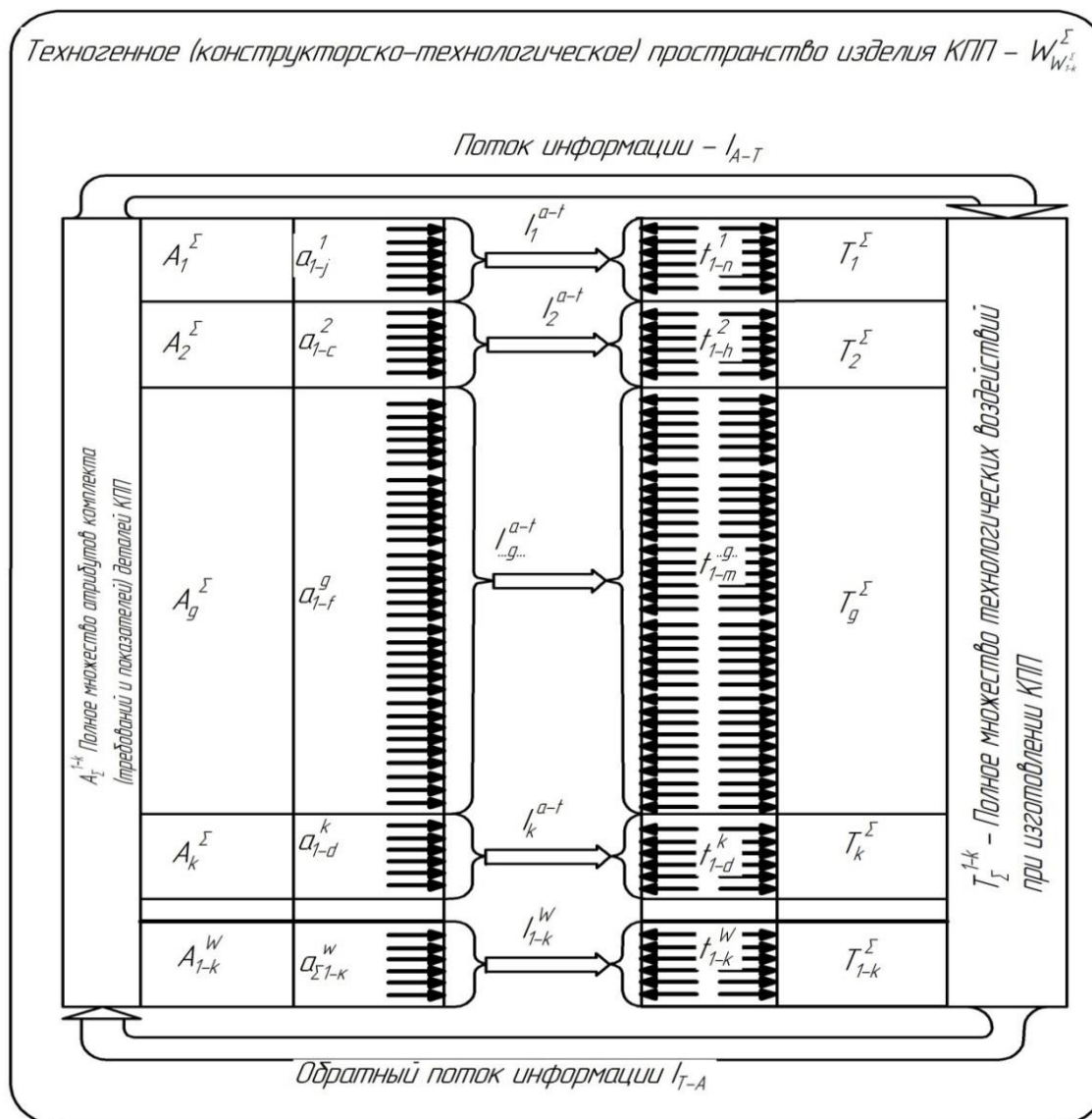


Рисунок 6. Характер взаимосвязей конструкторско-технологических показателей деталей КПП с функционально-ориентированными технологическими воздействиями

мощность при энергетическом воздействии, выбор режимов резания (скорость резания и подачу) в пределах допустимых по показателям качества;

t_{ik}^s – по варианту ведения контроля качества обработки: визуальный контроль по эталону, инструментальный контроль (универсальным мерительным инструментом) инструментальный контроль специальным мерительным инструментом – автоматический инструментальный операционный контроль, специальные приборные виды контроля (рентгеноскопия, магнитоскопия, радиоволновой и другие виды);

t_{iy}^w – w -ый вариант управления процессом обработки (в ручном режиме, с передачей информации на пульт, полуавтоматическое – наладочное, с обратной связью – рефлексивное, реактивное коррелятивное, иные виды перспективного управления).

При более глубокой детализации способов технологического воздействия на каждом итерационном уровне множества, отражающие показатели качества технологической системы, могут быть более углубленными и подробными, включая микровоздействия и нановоздействия, что не меняет принципиального подхода к решению задачи и построения функционально ориентированной технологии (ФОТ).

Конъюнкция выражений (1) и (2) составляет полное множество конструктивно-технологических и функционально-ориентированных технологических показателей для i -ой детали подмножества всех деталей, входящих в состав КПП.

$$W_i = A_{kik\Sigma} \& T_{ik\Sigma} \quad (7)$$

Таким образом, для каждой k -ой детали из состава КПП составляются множества вариантов функционально ориентированных технологических воздействий $T_{k\Sigma}$, поставленных в соответствие с требуемыми характерными показателями $A_{kx\Sigma}$ k -ой детали, обеспечивающих достижения показателей детали оптимальным образом по всем операциям, переходам с учетом режимов обработки и мощности воздействия.

Конъюнкция $W_k = A_{k1-k\Sigma} \& T_{k\Sigma}$ аналогично выражению (7) представляет полное множество конструктивно-технологических и функционально ориентированных технологических воздействий для изготовления k -ой детали оптимальным образом. Тогда выражение вида

$$W_{\Sigma} = \{W_1, W_2, \dots, W_m\} \quad (8)$$

Представляет собой полное множество всех технологических переделов по изготовлению коробки передач, которое может включать сборку и испытание изделия, а также решение логистических и экономических вопросов.

Выражения (7) и (8) позволяют отражать все особенности обрабатываемых деталей в связи с применяемыми функционально ориентированными частными технологиями на протяжении всего цикла обработки от заготовки до финальных операций в формализованном виде.

4. Заключение

1. Проведенные исследования подтверждают актуальность разработки механической зубчатой коробки переключения передач – КПП нового типа, работающей без разрыва потока передаваемой мощности.

2. Разработана схема КПП нового типа, обеспечивающая переключение передач без разрыва потока передаваемой мощности. Проверена работоспособность схемы КПП, определены некоторые особенности деталей новой коробки передач, требующие особого технологического подхода к разработке процесса изготовления, учитывающего все особенности деталей (в т.ч. модификацию зубьев вал-колеса на части зубчатых венцов). Установлены участки модификации сопрягаемых с зубчатыми колесами других деталей, отражаемых в технических требованиях показателей конструкторской документации.

3. Установлена однозначная взаимосвязь между конструкторско-технологическими параметрами, указанными в требованиях документации (и готовой детали) с функционально ориентированными параметрами технологических воздей-

ствий, обеспечивающих указанные требования. Установлено полное множество всех параметров в общем виде, отражающих набор показателей функционально ориентированных технологий, проявляющих свое преобразующее воздействие на всех операциях от получения заготовок и до финишных операций.

Характеристические показатели функционально-ориентированных технологий относительно обрабатываемых деталей имеют иерархическую соподчиненность, формализованное отражение которых требует изложения в отдельной работе.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дьяков, И. Ф. Ступенчатые и планетарные коробки передач транспортных машин. Учебное пособие. / И. Ф. Дьяков, В. И. Тарханов. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 143 с. – ISBN 978-5-9795-0773-6.
2. Гируцкий, О. И. Развитие конструкций и перспективы автоматических трансмиссий / Научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана / О. И. Гируцкий, В. П. Тарасик, С. А. Рынкевич // Наука и образование – № ФС77-48211 Государственная регистрация №0421200025. – ISSN 1994 Россия ФГУП НАМИ, Республика Беларусь. – Могилев: Белорусско-Российский университет.
3. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Учебное пособие // Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
4. Жданович, В. Ф. Комплексная механизация и автоматизация в механических цехах. Сер.: Библиотека технолога / В. Б. Жданович, Л. Б. Гай. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.
5. Политехнический словарь. Ред. И.И. Артоболевский. – М.: Советская энциклопедия, 1975.
6. Михайлов, А. Н. Общий подход в создании функционально-ориентированных и интегрированных технологий машиностроения / Машиностроение и техносфера XXI века. // Сборник трудов XII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-17 сентября 2005 г. в 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Т.2. – С. 261-274.
7. Суслов, А. Г. Функционально-ориентированные технологии обработки рабочих поверхностей деталей машин. – М.: Московский государственный индустриальный университет, 2014.
8. Михайлов, А. Н. Особенности проектирования функционально-ориентированных технологических процессов / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Сборник трудов по материалам международного научного симпозиума технологов-машиностроителей (Ростов-на-Дону, 14-17 сент. 2016 г.) – Ростов н/Д: ДГТУ, 2016. – С. 21–24.
9. Котляров, Б. С. Основы структурного синтеза модификаций зубьев цилиндрических колес и схем многоинструментальных роторных машин для их формообразования. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. – Харьков, 1989. – 25 с.
10. Сандлер, А. И. Модульные и функционально-ориентированные технологии в проектировании и производстве червячных передач / А. И. Сандлер, С. А. Лагутин, Е. А. Гудов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2017. – №3 (69). – С. 37-44.
11. Хог, Э. Прикладное оптимизированное проектирование: механические системы и конструкции / Э. Хог, Я. Арора. – М.: Мир, 1983.

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

УДК 678: 538.911

Е. В. Овчинников, д-р техн. наук, доц., **В. А. Лиопо**, д-р физ.-мат. наук, проф.,
А. П. Возняковский, д-р хим. наук, проф., **А. А. Возняковский**, аспирант,
Н. М. Чекан, канд. физ.-мат. наук, **Е. И. Эйсымонт**, канд. техн. наук, доцент.
Гродненский государственный университет, Беларусь
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, Россия
Физико-технический институт, Беларусь
Тел. +375(152)684108, E-mail: ovchin_1967@mail.ru

НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В статье рассмотрены вопросы формирования композиционных материалов на полимерной матрице, модифицированных нанодисперсными функционализированными углеродными частицами. Данные композиты нашли широкое применение в машиностроении при производстве деталей и изделий различного функционального назначения. В качестве объекта исследований использовали полиэтилен высокого давления, модифицированный функционализированными нанодисперсными частицами алмаза. Показано, что введение данного типа модификатора приводит к изменению в структуре модифицируемого полимера. Данный эффект сопровождается увеличением физико-механических характеристик композитов по сравнению с композиционными материалами, получаемыми модифицированием ультрадисперсными частицами детонационного алмазосодержащего графита.

Ключевые слова: структура, наноалмазы, свойство, трение, полиолефины

Y.V. Auchynnika, V.A. Liopa, A.P. Voznyakovsky, A.A. Voznyakovsky, N.M. Chekan, E.I. Eysymont

NANOCOMPOSITION FUNCTIONALIZED POLYMERIC MATERIALS

The article discusses the formation of composite materials on a polymer matrix modified with nanodispersed functionalized carbon particles. These composites are widely used in mechanical engineering in the production of parts and products for various functional purposes. High pressure polyethylene modified with functionalized nanodispersed diamond particles was used as an object of research. It is shown that the introduction of this type of modifier leads to a change in the structure of the polymer being modified. This effect is accompanied by an increase in the physicomachanical characteristics of composites in comparison with composite materials obtained by modifying ultrafine particles of detonation diamond-containing graphite.

Keywords: structure, nanodiamonds, property, friction, polyolefins

Введение. Среди широкой номенклатуры наноконпозиционных материалов на основе полимерных матриц особое место занимают полимеры, модифицированные аллотропными модификациями углерода – наноконпозиты, в составе которых преобладающее модифицирующее действие оказывают наночастицы алмаза, нанотрубок, нановолокон, нанодисперсной сажи и т.д. [1 – 5]. Анализ показывает, что наноконпозиционные материалы, полученные в результате модифицирования нанодисперсным углеродом, полученным по различным технологиям и введенный в расплав матричного связующего, представляют особый класс композитов, отличающихся по структуре и служебным характеристикам от традиционных композиционных материалов, полученных, например, путем смешения термодинамически несовместимых или совместимых полимеров [6 – 7].

Согласно проведенным исследованиям установлено, что на границе раздела «полимерная матрица – углеродная наночастица» происходят межфазные процессы, скорость протекания которых зависит от эксплуатационных параметров, а также

оказывают существенное влияние на триботехнические деформационно-прочностные, адгезионные, теплофизические и др. функциональные характеристики материалов и изделий [6-7].

Вместе с тем, системных исследований особенностей структуры и фазовых превращений в полимерных нанокомпозитах, содержащих углеродные нанодисперсные модификаторы недостаточно, что существенно влияет на диапазон практического применения конструкций и изделий из них [8, 9].

Далее представлены результаты комплексных исследований структуры нанокомпозитов, содержащих в своей структуре функционализированные нанодисперсные частицы алмаза на основе термопластичных матриц, которые наиболее широко применяют в производстве различных изделий для автотракторной, авиационной, железнодорожной, горнодобывающей техники, а также при производстве конструкций и технологического оборудования для химической промышленности, агропромышленного комплекса. Для придания полимерным материалам, требуемых физико-механических характеристик вводят нанодисперсные функционализированные частицы алмаза. Функционализацию частиц проводят путем обработки частиц в различных кислотах, что позволяет то или иной слой органических соединений с поверхности алмазного ядра, получаемого по взрывной технологии. Другим направлением является формирование «полимер-олигомерной шубы» на поверхности алмазного ядра путем обработки в растворе соответствующего полимера или олигомера, а также формирования таких слоев путем применения вакуумных технологий. В ряде работ [8-12] был установлен эффект существенного улучшения физико-механических и эксплуатационных свойств полимеров при модифицировании «допинговыми» добавками с содержанием модификатора ~0,005 мас. % – 0,1 % мас. Эффект повышения прочности композиций объясняется тем, что наполнитель выступает в роли искусственных зародышей структурирования, концентрируясь в кристаллической фазе полимера, и приводит к его упрочнению [8]. Показано, что модифицирование политетрафторэтилена ультрадисперсными кластерами синтетического углерода уменьшает на порядок интенсивность изнашивания полимера [12].

Методика эксперимента. Для определения структурных изменений в полиэтилене высокого давления (ПЭВД) при модифицировании его функционализированными нанодисперсными частицами алмаза исследовались рентгенограммы, полученные на рентгеновском дифрактомере общего назначения ДРОН-3.0. В дифрактометре использовали излучение линии $K\alpha$ от трубки с медным антикатодом, фильтрованное на длине волны – 1,541 Å. Степень кристалличности модифицированного полимера оценивали по формуле Руланда [12]:

$$\omega_c = [I_c / (I_c + kI_a)] \times 100\% \quad (1)$$

где I_c – интенсивность дифракционного максимума;

I_a – интенсивность аморфного гало; k – поправочный коэффициент [12];

ω_c – степень кристалличности. Средний размер кристаллитов L оценивали по формуле Шеррера [152]:

$$L = \lambda / \Delta \cos Q \quad (2)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения; Δ – полуширина максимума; Q – угловое положение максимума; L – средний размер кристаллитов

Для более детального изучения структурных изменений в ПО при введении ультрадисперсных кластеров синтетического углерода строили корреляционные

функции $W(r)$, связанные с функциями радиального распределения атомной плотности $4\pi r^2\rho(r)$ условием, вытекающем из формулы Цернике-Принса [12]:

$$W(r) = 4\pi r^2 \rho(r) - 4\pi r^2 \rho_{av} = 8\pi r \int \frac{I_o(S) - S f_k^2(S)}{\sum_k f_k^2(S)} S \sin(2\pi r S) dS \quad (3)$$

где $I_o(S)$ – нормированная интенсивность рассеянного рентгеновского излучения; f_k^2 – структурный фактор; k -го атома; ρ_{av} – средняя атомная плотность; r – модуль межатомного вектора (радиус координационной сферы). Триботехнические исследования проводили на машине трения типа FT-2, которая работает по схеме «плоскость – сфера» в условиях сухого трения сферического образца диаметром $R=1,5$ мм. Испытания проводили при нормальной нагрузке от 20 до 40 Н и линейной скорости скольжения 0,1-0,5 м/с. Морфологию поверхностей трения композиционных материалов осуществляли на универсальном металлографическом микроскопе “MDS 1600T”

Результаты исследований. Изменения в структуре полимеров, происходящие при введении модификатора, изучали методами ИК-спектроскопии. Исследования проводили на приборе Tensor 27. На рентгенограммах ПЭВД марки LD150 BW, модифицированных функционализированными частицами алмаза в области углов дифракции $2\theta = 14-30^\circ$ наблюдается отчетливое гало с наложенными на него достаточно выраженным брэгговскими максимумами (рисунки 1 – 2). В области углов $2\theta=32-50^\circ$ на рентгенограммах отмечено второе более размытое гало.

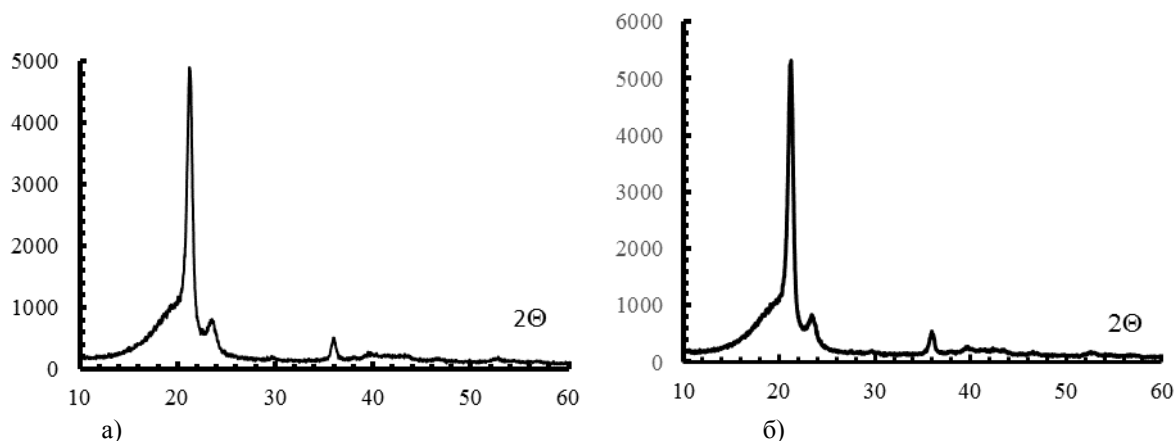


Рисунок 1. Рентгенограммы полиэтилена высокого давления, модифицированного функционализированными частицами нанодисперсного алмаза: а – содержание модификатора 0,17 % мас., б – содержание модификатора 0,25 % мас.

Проведенный расчет значений степени кристалличности по уравнению (1) показал, что введение модификатора приводит к изменению степени кристалличности модифицированных полимеров. Степень кристалличности модифицированного образца имеет точку экстремума, находящуюся в области концентраций модификатора $\sim 0,5$ % мас. и составляет ~ 82 % (таблица 1).

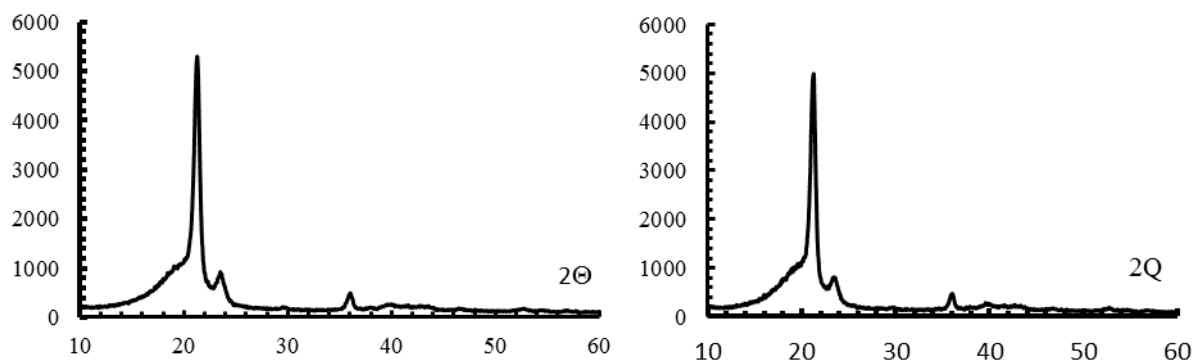


Рисунок 2. Рентгенограммы полиэтилена высокого давления, модифицированного функционализированными частицами нанодисперсного алмаза: а – содержание модификатора 0,5 %мас., б- содержание модификатора 1 % мас.

Таблица 1. – Зависимость степени кристалличности композиционных полимерных материалов от концентрации модификатора

С, %	0	0,17	0,25	0,5	1
ε, %	74	77	79	82	79

Модификатор оказывает влияние на средний размер кристаллитов полиэтилена. Введение 0,17 % модификатора в ПЭНД приводит к уменьшению размеров кристаллитов с 180 Å до 175 Å (таблица 2). Дальнейшее увеличение содержания ультрадисперсных кластеров синтетического углеродного вещества уменьшает средний размер кристаллов до 152 Å (концентрация 0,5 %).

Таблица 2. – Зависимость средних размеров кристаллов полимера от концентрации модификатора

С, %	0	0,17	0,25	0,5	1
гПЭВД, Å	180	175	173	152	164

Введение функционализированных частиц нанодисперсного алмаза приводит к существенным изменениям в аморфной части полимера (таблица 3). Для оценки изменений атомных координаций были использованы относительные координационные числа (ОКЧ), (число атомов в первой координационной сфере исходного полиэтилена принято за 100 %), т.е. ОКЧ соответствующей координационной сферы – это процентное отношение числа атомов в ней к числу атомов в сфере радиусом, равным радиусу первой координационной сферы исходного полиэтилена (таблица 3).

Таблица 3. – Зависимость относительного координационного числа ΔS от процентного содержания функционализированных частиц нанодисперсного алмаза в полиэтилене.

ПЭВД	С, %	0	0,17	0,25	0,5	1
	ΔS	1	1,14	1,19	1,21	1,22
	r, Å	1,56	1,53	1,51	1,50	1,49

Из таблицы видно, что введение модификатора в полиэтилен низкой плотности приводит к увеличению значения ОКЧ до 1,22. По-видимому, это связано с появлением

в аморфной матрице полимера областей молекулярного упорядочения. Необходимо отметить, что введение модификатора приводит к изменению радиуса координационной сферы, который соответствует длине связи С-С.

Определение оптической плотности полосы поглощения лежащей, в области 1378 см^{-1} и соответствующей поглощению метильных групп, показало, что введение функционализированных частиц нанодисперсного алмаза приводит к увеличению значений ее оптической плотности (таблица 4). Полоса поглощения, лежащая в области $720 - 730\text{ см}^{-1}$ соответствует маятниковым колебаниям групп $-\text{CH}_2-$ и зависит от степени упорядочения полимера. Введение модификатора приводит к увеличению значений оптической плотности данной полосы поглощения (таблица 4).

Таблица 4. – Зависимость оптической плотности полос поглощения от концентрации модификатора в ПЭВД

C, %	0	0,1	0,3	0,5	1
$D_{720,\nu}\text{ см}^{-1}$	0,71	0,96	0,95	0,89	0,75
$D_{1378,\text{ см}^{-1}}$	0,17	0,32	0,27	0,39	0,17

Таким образом, исходя из структурных исследований, можно констатировать, что введение функционализированных частиц нанодисперсного алмаза углерода приводит к структурным изменениям в аморфной части полиэтилена, происходит образование областей локального упорядочения. Наблюдается существенное изменение степени кристалличности полимеров при модифицировании, отмечается изменение размеров кристаллических образований. Увеличение оптической плотности полосы поглощения лежащей при 1378 см^{-1} , по-видимому, свидетельствует о формировании физической сетки лабильных связей в аморфной части полимера при введении модификатора.

Изменения в физических переходах, которые наблюдались при введении модификатора, изучали методами дериватографии. Исходя из данных ДТА, можно оценить степень кристалличности модифицированного полиэтилена путем сравнения площади эффекта плавления с площадью аналогичного эндотермического эффекта исходного полиэтилена. Исходя из проведенных исследований показано, что площадь эффекта плавления зависит от количества модификатора в полиэтилене, что подтверждает данные рентгеноструктурного анализа.

Изменения структуры, прочностных и теплофизических свойств, в конечном счете, сказывается на триботехнических характеристиках полиэтилена, модифицированного функционализированными частицами нанодисперсного алмаза (рис. 3-б).

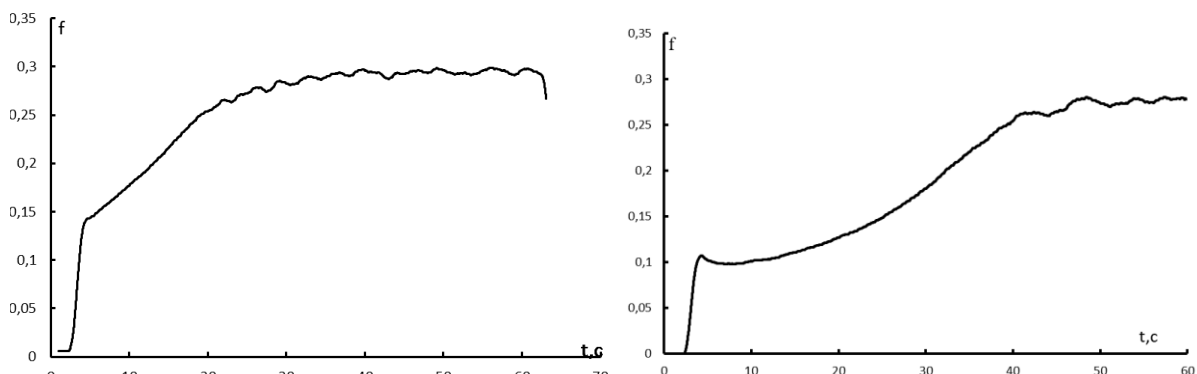


Рисунок 3. Зависимость коэффициента трения от времени трибоиспытаний пары трения «ШХ15-наноккомпозит». а- содержание функционализированных нанодисперсных

частиц алмаза в полиэтилене – 0,17 % мас., б- содержание функционализированных нанодисперсных частиц алмаза в полиэтилене – 0,25 % мас.

Зависимость коэффициента трения модифицированного полиэтилена от содержания функционализированных частиц нанодисперсного алмаза имеет немонотонный характер (рисунки 3 – 4). Минимальным значением коэффициента трения обладают композиции с содержанием модификатора ~ 1 % мас.

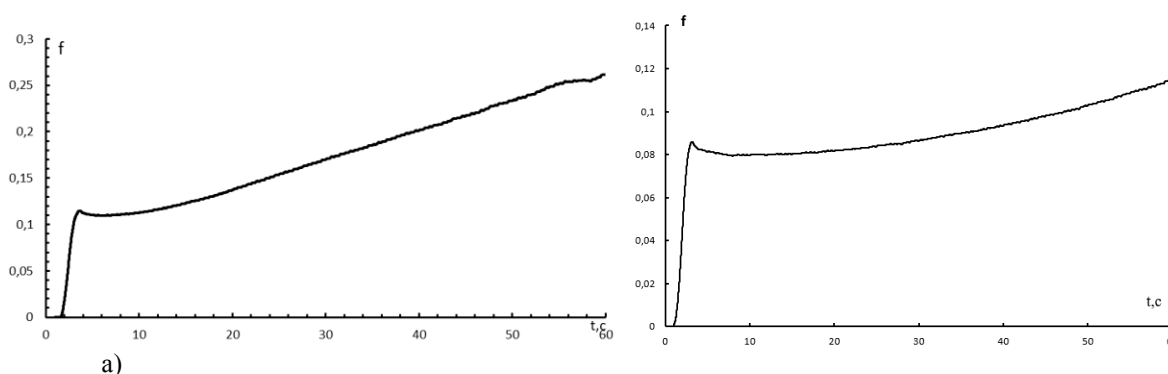


Рисунок 4. Зависимость коэффициента трения от времени трибоиспытаний пары трения «ШХ15-наноккомпозит»: а - содержание функционализированных нанодисперсных частиц алмаза в полиэтилене – 0,5 % мас., б - содержание функционализированных нанодисперсных частиц алмаза в полиэтилене – 1 % мас.

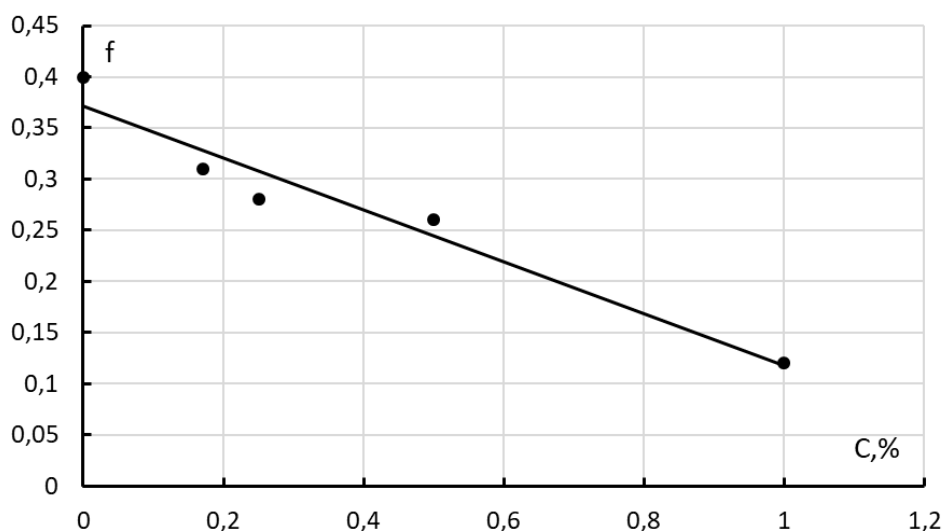


Рисунок 5. Зависимость коэффициента трения от концентрации нанодисперсного модификатора для пары трения «ШХ15-наноккомпозит»

На рисунке 6 приведены снимки поверхности трения полиэтилена, модифицированного ультрадисперсными кластерами синтетического углерода.

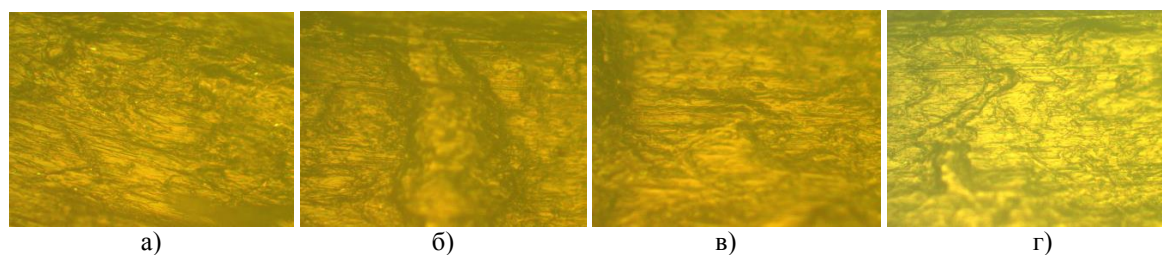


Рисунок 6. Морфология поверхности пары трения «ШХ15-наноккомпозит»: а - содержание функционализированных нанодисперсных частиц алмаза в полиэтилене – 0,17 % мас.; б - содержание функционализированных нанодисперсных частиц алмаза в полиэтилене – 0,25 % мас.; в - содержание функционализированных нанодисперсных частиц алмаза в полиэтилене – 0,5 % мас.; г - содержание функционализированных нанодисперсных частиц алмаза в полиэтилене – 1 % мас.

Изображение поверхности трения ПЭВД имеет отчетливо ориентированный вдоль направления скольжения рельеф с высотной характеристикой $R_a=456$ нм. Элементы рельефа представляют собой “валики”. Характер морфологии поверхности трения свидетельствует, что для ПЭВД при трении без подвода внешней смазки преобладает деформационная составляющая силы трения. Введение ультрадисперсных кластеров синтетического графита приводит к существенным изменениям в морфологии поверхности трения полимера. Так при содержании 0,17 % мас. ультрадисперсных кластеров образуются участки с пологим рельефом, однако значения R_a возрастают до 482 нм. Увеличение содержания модификатора в полимере приводит к дальнейшему сглаживанию рельефа и уменьшению размеров “валиков”, значения высотной характеристики составили 363 нм.

Характер зависимости коэффициента трения от процентного содержания, по-видимому, объясняется структурными изменениями в аморфной и кристаллической части полиэтилена. Так увеличение концентрации модификатора в полимере до 0,17 % приводит к возрастанию упорядоченности в аморфной части полиэтилена и как следствие снижению напряжения сдвига, что приводит к уменьшению коэффициента трения. При концентрациях шихты от 0,25 % – 1 % эффект упорядочения в аморфной части полимера увеличивается (таблица 10), в результате чего значения напряжения сдвига уменьшаются, что приводит к уменьшению значений коэффициента трения.

Заключение. Таким образом установлено, что основные структурные изменения в функционализированных нанодисперсных частиц алмаза происходят как в аморфной части, так и кристаллической части полимера. Происходит изменение надмолекулярной упаковки, повышается плотность флуктуационной сетки молекулярных зацеплений, увеличивается термостойкость полимера, наблюдается снижение коэффициента трения при концентрации 0,17 % мас. – 1 % мас. функционализированных нанодисперсных частиц алмаза в полиэтилене.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Моисеева, Л. С. Перспективы применения композиционных материалов на основе углеродных нановолокон и нанотрубок в нефтегазовой отрасли / Л. С. Моисеева // Композиционные материалы в промышленности. Трубопроводы из полимерных композиционных материалов: изготовление, проектирование, строительство, эксплуатация:

материалы 29 Международной конференции и семинара. Киев. УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2009. – С. 199 – 200.

2. Заглядова, С. В. Углеродные нанотрубки, полученные методом газофазного осаждения, как нанонаполнитель полимерных композиционных материалов / С. В. Заглядова [и др.] // Композиционные материалы в промышленности. Трубопроводы из полимерных композиционных материалов: изготовление, проектирование, строительство, эксплуатация: материалы 29 Международной конференции и семинара. Киев. УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2009. – С. 198 – 199.

3. Шпилевский, Э. М. Модифицирование полимеров фуллеренами / Э. М. Шпилевский, П. А. Витязь, С. А. Жданок // Поликомтриб 2009: Тезисы докладов международной научно-технической конференции – Гомель: ИММС НАНБ, 2009. – С. 253-254.

4. Скаскевич, А. А. Структура и технология малонаполненных машиностроительных материалов на основе конструкционных термопластов, модифицированных углеродными нанокластерами: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. / А. А. Скаскевич. – Минск, 2000. – 18 с.

5. Витязь, П. А. Перспективные нанофазные материалы на основе ультрадисперсных алмазов / П.А. Витязь // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. тр. Новополоцк. – 2001. – С. 4-8.

6. Песецкий, С. С. Полимерные наноккомпозиты: результаты и направление исследований и разработок / С. С. Песецкий, Б. Юрковский // Поликомтриб 2009: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Гомель: ИММС НАН Б, 2009. – С. 5-6.

7. Струк, В. А. К вопросу о совмещении термопластов и термоэластопластов / В.А. Струк, А.Ф. Мануленко, С. С. Песецкий и др. // Докл. АН БССР – 1986. – Т. 30 – С. 987-990.

8. Булдык, Е. П. Свойства полимерных систем, наполненных высокодисперсными кластерами синтетического углерода / Е. П. Булдык, М.М. Ревяко, В.А. Струк и др. // Материалы, технологии, инструменты -- №3 – 1998 – С. 41-45.

9. Охлопкова, А. А. Износостойкость и деформационно-прочностные характеристики политетрафторэтилена, содержащего ультрадисперсные оксиды и нитриды металлов / А. А. Охлопкова, А. В. Виноградов // Трение и износ – №17. – 1996. -- №3 – С. 382-385.

10. Воробьева, В. А. Влияние металлоплакирующих присадок на антифрикционные и противоизносные свойства моторного масла / В. А. Воробьева, Е. А. Лавринович, В. А. Мушинский, А. И. Лесникович // Трение и износ. – 1996. – Т. 17. – № 6. – С. 827-831.

11. Андрианова, О. А. Перспективы создания абразивного инструмента на основе самосмазывающихся полимеров и алмазов различной дисперсности / О. А. Андрианова, С. Н. Попов, Е. Ю. Шиц // Трение и износ – 1998. – Т. 19. – №1. – С. 71-74.

12. Вундерлих, У. Физика макромолекул. – М.: Мир, 1976. – 623с.

Поступила в редколлегию 12.02.2020 г.

УДК 621.941.1 (7.015)

И. А. Петряева, канд. техн. наук, **Е. П. Мельникова**, д-р техн. наук, профессор,
А. П. Рудыч, студент

Донецкий национальный технический университет, ДНР

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: irina_petryaeva@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ И ППД

На основе комплексного исследования взаимосвязей параметров обработки и их оптимизации по критерию максимальной производительности решена важная практическая задача разработки теоретического управления процессами комбинированной лезвийной и отделочно-упрочняющей обработки.

Ключевые слова: комбинированная обработка, алмазное выглаживание, шероховатость, оптимизация, критерий производительности.

I. A. Petryaeva, E. P. Melnikova, A. P. Rudich

RESEARCH OF FEATURES OF IMPROVING THE QUALITY OF THE SURFACE LAYER AND PROCESSING PRODUCTIVITY AT THE BASIS OF APPLICATION OF COMBINED PROCESSING BY TURNING AND SPD

On the basis of complex research of intercommunications between the parameters of treatment and their optimization on the criterion of the burst performance the important practical task of development of theoretical government the processes of combined treatment is decided.

Keywords: combined processing, diamond smoothing, roughness, optimization, performance criterion.

1. Введение

Использование комбинированных методов механической обработки деталей машин достаточно перспективно для повышения эффективности современного машиностроительного производства. Многообразие методов механообработки определяет широту возможностей по их комбинированию. Однако не все комбинации имеют практическую ценность. Во многих случаях технические показатели комбинированных процессов близки, часть процессов несовместима и их сочетание может привести к ухудшению качественных характеристик поверхностного слоя. Особое место среди методов повышения качества деталей машин занимает комбинированная обработка, совмещающая лезвийную и отделочно-упрочняющую обработку. Такой метод позволяет не только повысить качество поверхности, но и дает возможность увеличить производительность, снизить трудоемкость обработки, является существенным преимуществом комбинированной обработки перед другими средствами повышения качества поверхностного слоя.

Основные закономерности формирования поверхностного слоя деталей отдельно для лезвийной и отделочно-упрочняющей обработки широко представлены в справочно-нормативной литературе в виде теоретических и эмпирических зависимостей [1, 2, 3]. Однако сведения об особенностях комбинированной обработки практически отсутствуют, что затрудняет обоснование рациональных условий ее применения и прогнозирования параметров состояния обработанной поверхности.

В последующее время известны рекомендации по оптимизации режимов комбинированной обработки точением и обкаткой с использованием метода линейного программирования [4]. Среди методов отделочно-упрочняющей обработки значительное место занимает алмазное выглаживание [5]. Практический интерес представляет обоснование возможности использования комбинированной обработки точением и выглаживанием и определение оптимальных режимов комбинированной обработки, обеспечивающих максимальную производительность для любых заданных условий и требований к качеству обработанных поверхностей.

Цель представленной работы: повышение производительности механической обработки и качества поверхностного слоя деталей машин за счет применения комбинированной обработки, совмещающей выглаживание с предварительной обработкой точением.

2. Основное содержание и результаты работы

Исследование закономерностей формирования параметров состояния поверхностного слоя, в частности шероховатости, при комбинированной обработке, в том числе при одновременной обработке точением и поверхностно-пластическим деформированием, имеет определенные особенности. В том случае, когда ППД осуществляется как самостоятельная операция, параметры исходной шероховатости постоянные. При комбинированном точении и выглаживании исходные параметры шероховатости зависят от условий обработки, что необходимо учитывать при их нормировании.

Высота профиля шероховатости определяется составляющими профиля шероховатости, обусловленными геометрическими параметрами инструмента, деформациями обрабатываемого материала, шероховатостью кромок режущего инструмента.

Для определения составляющей профиля шероховатости, обусловленной геометрическими параметрами инструмента, используются известные для каждого из видов обработки теоретические зависимости:

- при отделочно-упрочняющей обработке:

$$R_{z\text{ оу}} = S^2/8R + R_{zi} - h_{\text{пл оу}} + R_{\text{ин оу}}, \quad (1)$$

- при лезвийной обработке, являющейся исходной для последующей отделочно-упрочняющей:

$$R_{z\text{ исх}} = \frac{r}{\cos \gamma} - \frac{\sqrt{4r^2 - S^2}}{2 \cos \gamma} + h_{\text{пл лез}} + R_{\text{ин лез}}, \quad (2)$$

где R - радиус индентора; r - радиус при вершине резца; S - подача; $h_{\text{пл оу}}$, $h_{\text{пл лез}}$ - величины пластических деформаций; $R_{z\text{ оу}}$ - составляющая профиля шероховатости при отделочно-укрепляющей обработке; $R_{z\text{ исх}}$ - исходная высота шероховатости; $R_{\text{ин}}$ - шероховатость кромок режущего инструмента; $R_{\text{ин оу}}$, $R_{\text{ин лез}}$ - высота неровностей профиля шероховатости инструментов; γ - передний угол резца.

Составляющая профиля, обусловленная деформациями обрабатываемого материала определяется как разница исходной высоты шероховатости $R_{z\text{ исх}}$ и величины ее пластических деформаций $h_{\text{пл}}$:

$$h_z = R_{z\text{ исх}} - h_{\text{пл}}. \quad (3)$$

Фактическая площадь контакта инструмента и заготовки с учетом исходной шероховатости определяется следующей зависимостью [1]:

$$A_r = A_a \frac{t_{m\text{ исх}}}{100} \left(\frac{h_{\text{пл}}}{R_{P\text{ исх}}} \right)^{\nu_{\text{исх}}}, \quad (4)$$

где $t_{m_{исх}}$ - относительная длина опорной линии исходного профиля шероховатости на уровне средней линии, %; $R_{p_{исх}}$ - высота сглаживания выходного профиля шероховатости; $v^{исх}$ - параметр начального участка кривой опорной линии исходного профиля шероховатости.

A_a - номинальная площадь контакта инструмента и заготовки, состоит из фронтальной площади контакта $A_{a_{фр}}$ и площади упругого последствия $A_{a_{упр}}$:

$$A_a = A_{a_{фр}} + A_{a_{упр}} \quad (5)$$

При контакте индентора с заготовкой составляющие номинальной площади определяются из рис. 1.

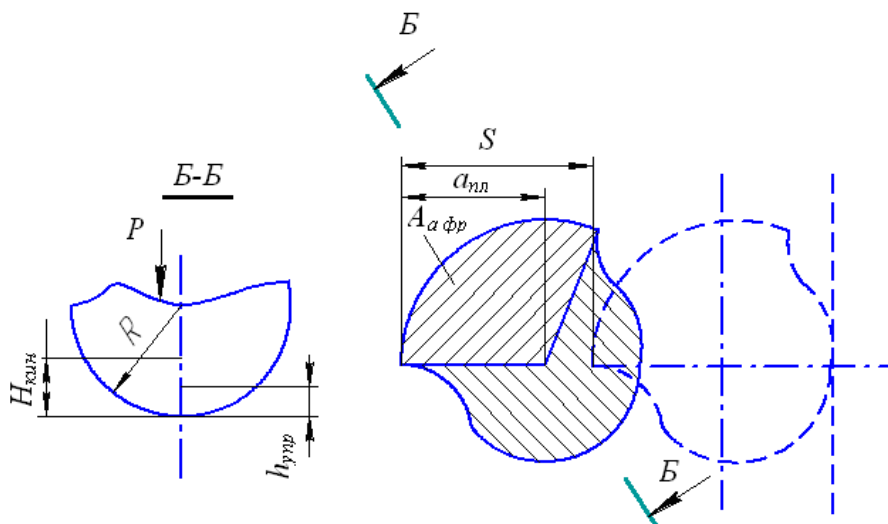


Рисунок 1. Исходная схема для расчета номинальной площади контакта индентора и детали при обработке ППД

Сложные теоретические зависимости целесообразно представить в упрощенном

виде, в виде регрессионной зависимости параметра шероховатости R_a от подачи S при комбинированной обработке:

$$R_{a_{ком(S)}} = A \cdot S^a, \quad (6)$$

где A - постоянный коэффициент, a - показатель степени влияния подачи на параметр шероховатости.

Для следующих условий комбинированной обработки точением и выглаживанием построены графики зависимости параметра шероховатости (рис. 2): $R_a = 0,2R_z$ от подачи: обрабатываемый материал-сталь 45; радиус при вершине резца $r = 2$ мм; передний угол резца $\gamma = 5^\circ$, углы в плане $\phi = 45^\circ$, $\phi_1 = 45^\circ$; глубина резания $t = 1$ мм; диаметр индентора $D = 3$ мм; усилие выглаживания $P = 100$ Н.

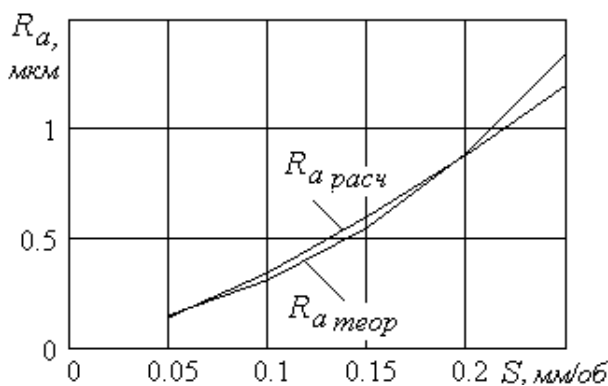


Рисунок 2. Графики зависимости регрессионных $R_{a_{расч}}$ и теоретических $R_{a_{теор}}$ параметров шероховатости от подачи S при совместном точении и алмазном выглаживании

Для приведенных условий обработки, с использованием программного пакета Mathcad 2001 Professional установлена зависимость:

$$R_{a\text{ком}} = 7,69S^{1.34} \quad (7)$$

На рис. 2 представлены графики зависимости параметра шероховатости от подачи при комбинированной обработке точением и выглаживанием, полученные по теоретической и регрессионной зависимости.

По полученным графикам может оцениваться изменение шероховатости при изменении подачи, а также устанавливаться значение подачи, соответствующее заданным значениям параметров шероховатости.

Приведенная регрессионная зависимость позволяет рассчитать значение шероховатости в зависимости от подачи для широкого диапазона условий. В качестве примера использования приведенной эмпирической зависимости представлены значения показателей a и A для некоторых условий обработки.

Таблица 1. – Значения коэффициентов регрессионной зависимости шероховатости от подачи

Обрабатываемый материал			30	45	40Х	18ХГТ
σ_B , МПа			490	598	630	700
σ_T , МПа			294	353	330	430
Радиус при вершине резца	0,8	A	22,97	18,56	19,49	19,01
		a	1,78	1,55	1,61	1,58
	1,2	A	14,18	12,12	12,57	12,34
		a	1,65	1,46	1,51	1,48
	1,6	A	10,47	9,25	9,52	9,38
		a	1,55	1,38	1,44	1,41
	2	A	8,54	7,68	7,87	7,77
		a	1,49	1,33	1,38	1,36
	2,4	A	7,38	6,71	6,87	6,79
		a	1,44	1,3	1,34	1,32

Полученная зависимость параметра шероховатости $R_{a\text{ком}}$ от подачи S используется для определения оптимальных режимов комбинированной обработки. Оптимизацию выполняем методом линейного программирования [4], что позволяет осуществлять одновременную оптимизацию скорости и подачи с учетом действующих при обработке ограничений по критерию максимальной производительности.

В качестве целевой функции рассматриваем производительность обработки, обусловленную основным временем: $t_0 = L/ns$. Максимум производительности достигается при минимуме основного времени, или максимуме произведения $n \cdot s \rightarrow \max$.

При комбинированной лезвийной и отделочно-упрочняющей обработке рассматриваются следующие ограничения:

1) по возможностям лезвийного режущего инструмента, обусловленных скоростью резания, соответствующего его стойкости.

$$\pi Dn/1000 \leq C_V K_V / T^{m_V} t^{x_V} s^{y_V}, \quad (8)$$

где D – диаметр обработки, C_V , K_V – коэффициенты и x_V , y_V , m_V – показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи s и стойкости T на скорость резания V , определяемые в зависимости от условий эксплуатации;

2) по предельно допустимой мощности резания, обусловленной мощностью электродвигателя привода главного движения станка N_{cm} :

$$K_o C_P K_P S^{y_p} t^{x_p} (\pi L n)^{(n_p + 1)} / 6 \cdot 10^{3(n_p + 2)} \leq N_{cm} \eta \quad (9)$$

где C_P, K_P – коэффициенты, x_p, y_p, n_p – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и скорости на силу резания P_z , определяемые в зависимости от условий эксплуатации, η – коэффициент полезного действия передач станка; K_o – коэффициент, учитывающий увеличение сил во время комбинированной обработки, принимается в диапазоне 1,2-1,5;

3) по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности R_a :

$$A \cdot S^a \leq R_{a\ доп} \quad (10)$$

4) по температуре резания:

$$C_t t^{x_t} S^{y_t} v^{n_t} \leq \Theta_{доп} \quad (11)$$

где C_t – постоянный коэффициент для заданных условий обработки, n_t, y_t, x_t – показатели степени, которые определяют влияние на температуру скорости резания, подачи и глубины резания.

5) по предельно допустимым диапазонам частоты вращения и подачи, обусловленным кинематической структурой привода главного движения и привода подач:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, \quad S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \quad (12)$$

На основании выполненного анализа ограничений, для любых условий комбинированной обработки точением и поверхностным пластическим деформированием оптимальная подача может быть определена:

$$S_{opt} = (Ra / A)^{1/a} \quad (13)$$

Оптимальная скорость резания:

$$v_{opt} = \begin{cases} \left(\frac{\Theta \cdot S_{opt}^{-y_t}}{C_t \cdot t^{x_t}} \right)^{\frac{1}{z_t}}, & \text{если } \Theta_{доп} < \Theta_0 \\ \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot t^{x_v} S_{opt}^{y_v}}, & \text{если } \Theta_{доп} \geq \Theta_0 \end{cases},$$

где Θ_0 – температура обработки, определяющая влияние температуры на оптимальные режимы комбинированной обработки:

$$\Theta_o = C_t t^{x_t} \left(\frac{C_v K_v}{T^m t^{x_v}} \right)^{n_t} \left[\frac{A}{R_a} \right]^{\frac{(y_t n_t - y_t)}{a}}.$$

По этим формулам можно определять оптимальные режимы комбинированной обработки точением и выглаживанием для любых исходных условий.

Приведенная методика определения оптимальных режимов комбинированной обработки точением и поверхностным пластическим деформированием базируется на использовании эмпирических зависимостей для формирования системы ограничений. Такие зависимости являются представительными, математическая модель процесса комбинированной обработки определяется в результате линеаризации этих

ограничений путем логарифмирования. Однако эти зависимости имеют ограниченную область применения и могут быть использованы только для конкретных заранее оговоренных условий: для заданной геометрии инструмента, характеристик обрабатываемого материала, режимов обработки.

Для определения оптимальных режимов комбинированной обработки точением и выглаживанием составлена табл. 2, что позволяет найти оптимальное сочетание скорости, подачи в зависимости от требуемых параметров шероховатости обрабатываемой поверхности и глубины резания при точении для указанных условий при ограничении по температуре $\theta_{доп} = 800^\circ\text{C}$.

Таблица 2. – Оптимальные значения режимов комбинированной обработки точением и поверхностным пластическим деформированием

Глубина t , мм	Шероховатость обработанной поверхности Ra, мкм									
	0.25		0.32		0.5		0.63		1.25	
	S, мм/об	V, м/мин	S, мм/об	V, м/мин	S, мм/об	V, м/мин	S, мм/об	V, м/мин	S, мм/об	V, м/мин
0.5	0,07	140	0,09	125,7	0,1	102	0,15	92	0,25	68
0.8		129		115		94		92,5		62
1		124		111,5		91		82		60
1.5		116		105		85		76		56

3. Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено влияние параметров механической обработки на шероховатость обработанной поверхности, разработаны рекомендации по выбору оптимальных режимов резания и условий комбинированной обработки, обеспечивающих повышение производительности обработки и качества поверхностного слоя деталей машин для любых условий механической обработки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Качество машин: Справочник в 2-х т. / А. Г. Суслов, Э. Д. Браун, Н. А. Виткевич [и др.]. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
2. Качество машин: Справочник в 2-х т. Т. 2 / А. Г. Суслов, Ю. В. Гуляев, А. М. Дальский [и др.] – М.: Машиностроение, 1995. – 430с.
3. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208с.
4. Ивченко, Т. Г. Оптимизация параметров процесса лезвийной и отделочно-упрочняющей обработки / Т. Г. Ивченко, О. С. Дубоделова // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. трудов XII Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Т. 2. – С. 34-36.
5. Бойцов, А. Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.

Поступила в редколлегию 14.02.2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Воробьёв А.К., Зуев Е.А. ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЙ ГЛАВНЫХ ЦИЛИНДРОВ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ДЛЯ ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ	3
Горобец И.А. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ДВИЖИТЕЛЯ БСП НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГОРНОГО КОМБАЙНА	9
Ивченко Т.Г., Андреева А.А., Епишева М.А. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОНКОМ ТОЧЕНИИ РЕЗЦАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ	16
Кравченко П.Д., Федоренко Д.Н. ДИССИПАЦИЯ КРЕАТИВНОГО ВРЕМЕНИ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ТЯЖЕЛОГО И АТОМНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ	23
Лебедев В.А., Тороп Ю.А., Барышникова О.Е. ДОРНОВАНИЕ ШЛИЦЕВЫХ ОТВЕРСТИЙ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА	30
Михайлов Д. А., Шейко Е. А., Михайлов В. А., Михайлов А. Н. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	36
Михайлов А.Н., Котляров Б.С., Котляров В.Б. ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ НОВОЙ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ КПП С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ПЕРЕДАЧ БЕЗ РАЗРЫВА ПОТОКА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ.....	50
Овчинников Е.В., Лиопо В.А., Возняковский А.П., Возняковский А.А., Чекан Н.М., Эйсымонт Е.И. НАНОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	63
Петряева И.А., Мельникова Е. П., Рудыч А.П. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИ-НИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТОЧЕНИЕМ И ППД	71

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Андреева А.А.	16
Барышникова О.Е.	30
Возняковский А.А.	63
Возняковский А.П.	63
Воробьев А.К.	3
Горобец И.А.	9
Епишева М.А.	16
Зуев Е.А.	3
Ивченко Т.Г.	16
Котляров Б.С.	50
Котляров В.Б.	50
Кравченко П.Д.	23
Лебедев В.А.	30
Лиопо В.А.	63
Мельникова Е.П.	71
Михайлов А. Н.	36, 50
Михайлов В. А.	36
Михайлов Д. А.	36
Овчинников Е.В.	63
Петряева И.А.	71
Рудыч А.П.	71
Тороп Ю.А.	30
Федоренко Д.Н.	23
Чекан Н.М.	63
Шейко Е. А.	36
Эйсымонт Е.И.	63

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 30 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.org>, а также размещен на сайте кафедры «Технология машиностроения» ДонНТУ, г. Донецк: <http://tm.donntu.org>
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, украинский 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.org 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 и 7.12), полное название организаций и стран, тел./факс, E-mail, название статьи, аннотация на языке статьи, ключевые слова, основной текст, заключение или выво-

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

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате *.bmp, *.gif, *.psx, *.dwg, *.jpg - размерами не менее 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 вверху справа, шрифт жирный, 12 pt).

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

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

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

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

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

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

7. Введение (Introduction). (12 pt)

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

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

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

9. Авторский знак. Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2020 (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: +38 062 305-01-04.

E-mail: tm@fimm.donntu.org 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.org (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.; 2016 (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 «Научно-технические технологии в машиностроении: ежемесячный научно-технический и производственный журнал». – М: Машиностроение. – 2014. - № 9. – С. 11-17.

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

(пустая строка - 12 pt)

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

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Выпуск 2 (69)' 2020

Главный редактор
д-р техн. наук, проф. А.Н. Михайлов
E-mail: tm@fimm.donntu.org
Технический редактор Л. Б. Ступакова

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ», +38
(062) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. +38 (071) 306-08-79, +38
(062) 301-08-05.

E-mail: tm@fimm.donntu.org

Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

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