

Вып. 4 (83)' 2023 **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



ДОНЕЦКИЙ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ

ТЕХНИЧЕСКИЙ

УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 4 (83)' 2023



ДОНЕЦК - 2023

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 4 (83)' 2023

Донецк – 2023

УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 2 от 31 марта 2023 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 **Донецкого Регионального Отделения «Союз машиностроителей России»**

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

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

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

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

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

ISSN 2073-3216

ISSN 2518-7120 (E)

© Авторы статей, 2023
© ГОУВПО «ДОННТУ», 2023

УДК 621.7

М. С. Зародов, ассистент, **А. Н. Зародова**, ассистент,
Ю. В. Майстров, канд. техн. наук, доцент
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия
Тел: +7 910 449 74 75; E-mail: maxzar02@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ СТАЛИ 08ПС

В статье описан порядок проведения испытаний для построения кривой предельных деформаций (FLC), и приведены результаты для стали 08пс.

Ключевые слова: диаграмма предельных деформаций, кривая предельных деформаций, FLD-диаграмма, сталь 08пс

M. S. Zarodov, A. N. Zarodova, U. V. Maistrov

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FORMING LIMIT CURVE FOR STEEL 08

The article describes the procedure for conducting tests to development a forming limit curve (FLC) and presents the results for steel 08.

Keywords: forming limit diagram, FLD, forming limit curve, FLC, steel 08.

1. Введение

Главной целью моделирования процесса листовой штамповки численными методами является прогнозирование дефектов, возникающих при деформировании [1,2]. В процессе моделирования оцениваются НДС, утонение, пружинение и т.д. Для анализа предельного формоизменения материала при листовой штамповке широко применяются диаграммы предельных деформаций (FLD-диаграммы), которые устанавливают связь между компонентами главных деформаций в момент разрушения.

Диаграмма FLD строится в осях ε_1 – ε_2 (рис.1) и показывает уровень критических главных деформаций листа из металла конкретной партии, определяется экспериментально для определенной толщины листа, для каждой марки материала, а иногда для каждой партии проката. Для оценки формуемости материала достаточно провести испытания и построить одну кривую, кривую предельных деформаций (FLC) по нескольким точкам, характеризующим разное деформированное состояние. Площадь под кривой FLC охватывает все возможные комбинации деформаций, которые лист выдерживает без разрушения.

2. Основное содержание и результаты работы

Для определения предела формообразования возможны два различных способа:

1. Анализ деформаций на деталях с браком. Этот метод описан в [3].

2. Определение предельных деформаций в ходе специальных испытаний [4].

Данный метод более удобен и универсален.

На плоскую и недеформированную поверхность наносится сетка с точными размерами или стохастический (случайный) узор. Затем эта заготовка деформируется с использованием процедуры Наказимы или Марчиньяка до момента разрушения. Далее проводятся измерения и измеренные деформации обрабатывают таким образом, чтобы исключить из результатов суженную или поврежденную область.

Для точного определения FLC необходимо, чтобы в зоне оценки было почти полное отсутствие трения.

Пределы формообразования определяются для нескольких различных соотношений между ε_1 и ε_2 . Деформированное состояние варьируется от одноосного растяжения до двухосного растяжения. Совокупность точек в различных состояниях деформации изображаются в виде кривой предельных деформаций. Кривая выражается как функция двух истинных деформаций ε_1 и ε_2 на поверхности листа и наносится на FLD-диаграмму.

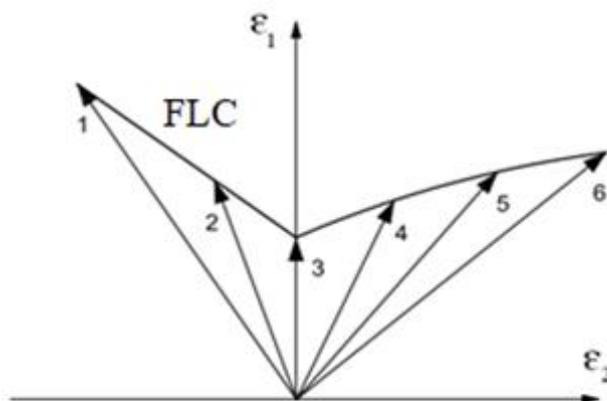


Рисунок 1. Структура FLD-диаграммы.

Согласно [4] существуют 2 основных метода проведения испытаний для построения кривой предельных деформаций: метод Наказимы и метод Марчиньяка.

Метод Наказимы основан на деформации листовых заготовок полусферическим пуансоном. Основными недостатками метода являются трудность наблюдения за течением процесса, сложная система смазочных материалов для создания условий минимального трения.

При испытаниях по методу Марчиньяка деформирование ведется цилиндрическим пуансоном с плоским дном (рис. 2). Для предотвращения контакта между исследуемым образцом и плоской поверхностью пуансона необходимо использовать подкладную заготовку – разрушение произойдет в нужном месте и обеспечит равномерное распределение деформации. Подкладные заготовки должны быть вырезаны из материала, по крайней мере столь же пластичного, как испытываемый материал. Разрушение подкладной заготовки никогда не должно происходить до разрушения исследуемого листового материала. Толщина подкладной заготовки должна быть больше 80% толщины испытываемой заготовки, и их можно использовать несколько штук. Размер подкладной заготовки должен быть равен размеру испытываемого образца. Подкладная заготовка должна иметь центральное отверстие 32-34 мм, центрированное относительно пуансона с качеством кромки, достаточным для преждевременного разрушения. При необходимости подкладную заготовку можно разрезать на две части (перпендикулярно направлению деформации). Полезно увеличить силу трения между испытываемой заготовкой и подкладной заготовкой путем, например, пескоструйной обработки последней.

Перед испытанием смазка наносится на пуансон. Трещина должна образоваться в плоской зоне над отверстием подкладной заготовки.

Фланец заготовки должен быть зафиксирован, чтобы обеспечить равномерность деформации. Возможны следующие способы фиксации: использование перетяжных

ребер, достаточное усилие прижима, зубчатых инструментов или инструментов с накаткой (при условии, что два последних метода не связаны с риском локализации деформации или разрушения заготовки).

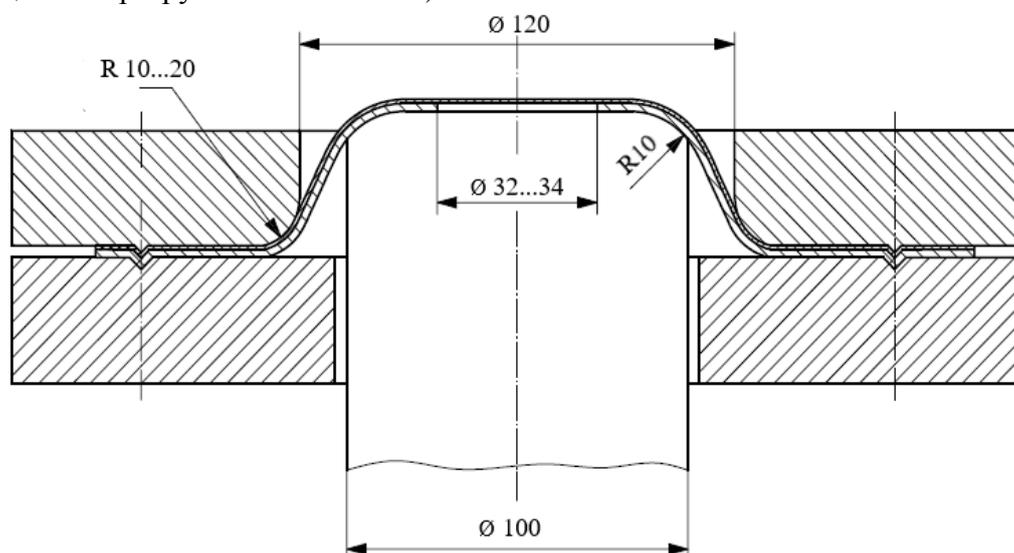


Рисунок 2. Схема инструмента для испытания по Марчиньяку.

Оборудование для испытаний должно обеспечивать постоянную скорость деформирования $1,5 \pm 0,5$ мм/с. Температура испытания должна составлять $23 \pm 5^\circ\text{C}$

В качестве образцов для испытаний применяются заготовки различной формы, толщиной от 0,3 до 4 мм. Рекомендуется следующая геометрия образца (рис.3): длина рабочей части 25 мм, радиус скругления $R = 20$ мм. Величина H (ширина рабочей части) варьируется от 20 до диаметра заготовки.

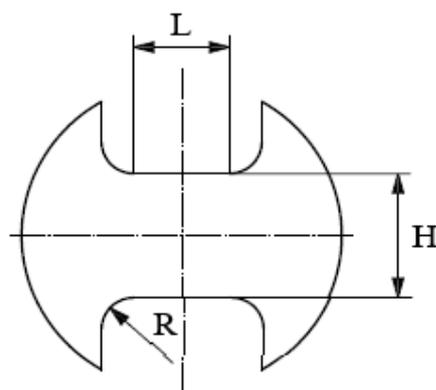


Рисунок 3. Размеры заготовок-образцов для испытаний: L - длина рабочей части, H - ширина рабочей части, R - радиус скругления

При $\varepsilon_2 > 0$ возможны заготовки с полукруглыми вырезами разного радиуса. Для стали (в основном из мягких марок стали) достаточно прямоугольных полос различной ширины. При внешней круглой форме заготовок достигается более равномерное распределение экспериментальных предельных точек формообразования, чем при использовании прямоугольных полос [5].

Способы получения заготовок должны использоваться, не вызывающие трещин, наклепа или изменения микроструктуры на кромке, чтобы разрушение не началось с края испытываемого образца.

Для описания полного FLC необходимо не менее пяти геометрий. (Рекомендуется равномерное распределение FLC от одноосного до двухосного растяжения.) Если описание полного FLC не требуется, то допускается меньшее количество геометрий, но это должно быть указано в отчете об испытаниях. Используется не менее трех годных образцов каждой геометрии. В данной работе использовались 3 вида образцов толщиной 1 мм: $H_1 = 20$ мм, $H_2 = 125$ мм и $H_3 = 230$ мм.

Для стали направление проката должно быть перпендикулярно шейке образца, для алюминия – параллельно шейке (рис.4).

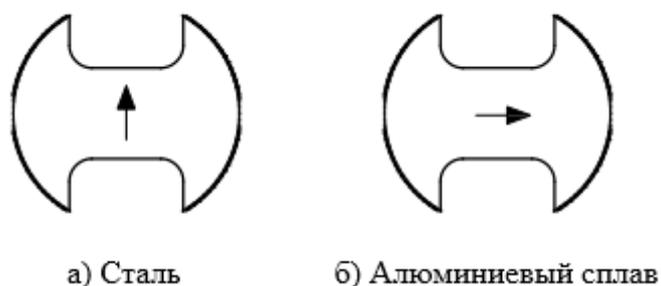


Рисунок 4. Зависимость положения рабочей части образца от направления прокатки для разных материалов

Рекомендуемый размер сетки приблизительно равен толщине материала, но не более 2,5 толщин. Как правило используется сетка 1 или 2 мм. Сетка должна иметь высокий контраст и должна наноситься без эффекта надрезов и/или изменения микроструктуры (рис. 5). Некоторыми распространенными методами нанесения являются электрохимическая, фотохимическая, офсетная печать и перенос сетки.

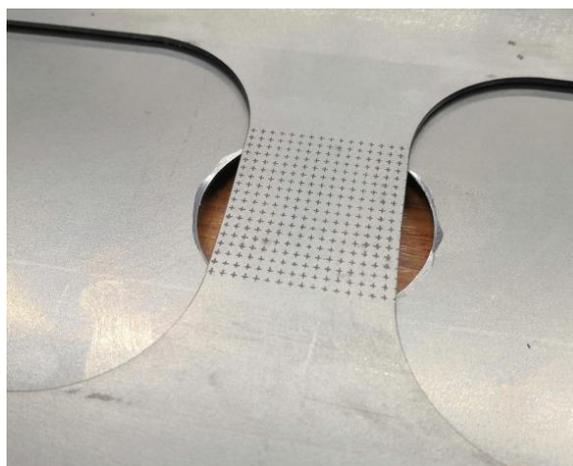


Рисунок 5. Сетка, используемая в эксперименте нанесена на образец электрохимическим способом с шагом 1.5 мм

С камеры, закрепленной непосредственно в оснастке, записывается начальное изображение и последовательность изображений на последних этапах деформирования до появления трещины (рис. 6). Затем определяется направление перпендикулярно трещине на изображении с трещиной и переносится обратно на последнее изображение до того, как трещина становится видимой. Это направление используется для выборки значений $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$.

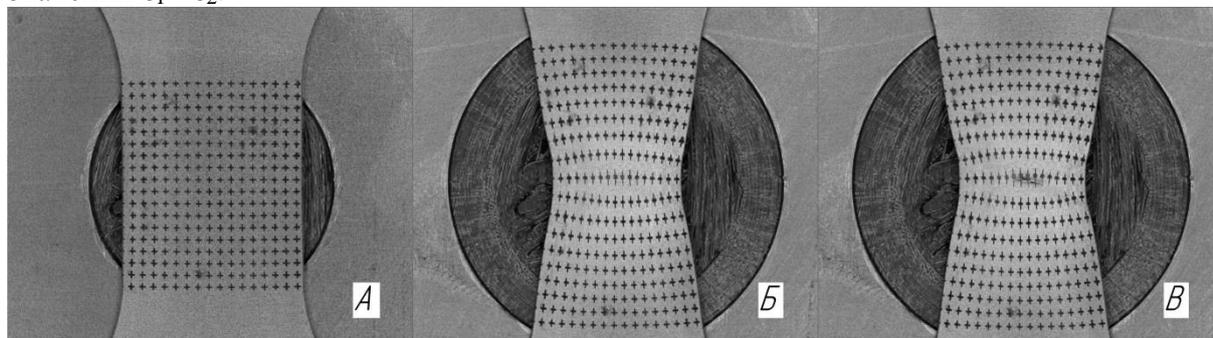


Рисунок 6. Этапы эксперимента для образца с $H=25$ мм, где А – начальный этап, недеформированный образец, Б – последний этап, перед образованием трещины, В – разрушение образца.

Измерение деформаций происходит любым удобным измерительным устройством. Погрешность измерительного устройства должна быть не более 1 % измеренной длины. Рекомендуются камеры и программное обеспечение, обеспечивающие общую точность измерений более 2 %.

Измерение деформации может быть выполнено либо путем измерения только конечного размера сетки, где известна точность исходной сетки, либо путем сравнения конечного размера сетки относительно исходного.

Были проведены испытания, полученные данные обработаны, по методике, описанной в [4]. Исходные данные и результаты представлены в таблице 1. По этим данным построена кривая предельных деформаций (рис. 7)

Таблица 1. Результаты испытаний по Марчиньяку образцов с разной геометрией

№	Ширина рабочей части Н, мм	ε_1	ε_2
1	25	0,52	-0,22
2	125	0,31	-0,03
3	230	0,35	0,34

Образцы без боковых вырезов (3) позволяет получить точку на кривой предельных деформаций, которая соответствует двухосному растяжению ($\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$). Образцы с максимальными вырезами (1) позволяет получить точку, которая приблизительно соответствует одноосному растяжению ($\varepsilon_1 \approx -2\varepsilon_2$). У образцов с шириной рабочей части 125 мм (2) наблюдается практически плоское деформированное состояние ($\varepsilon_2 \approx 0$).

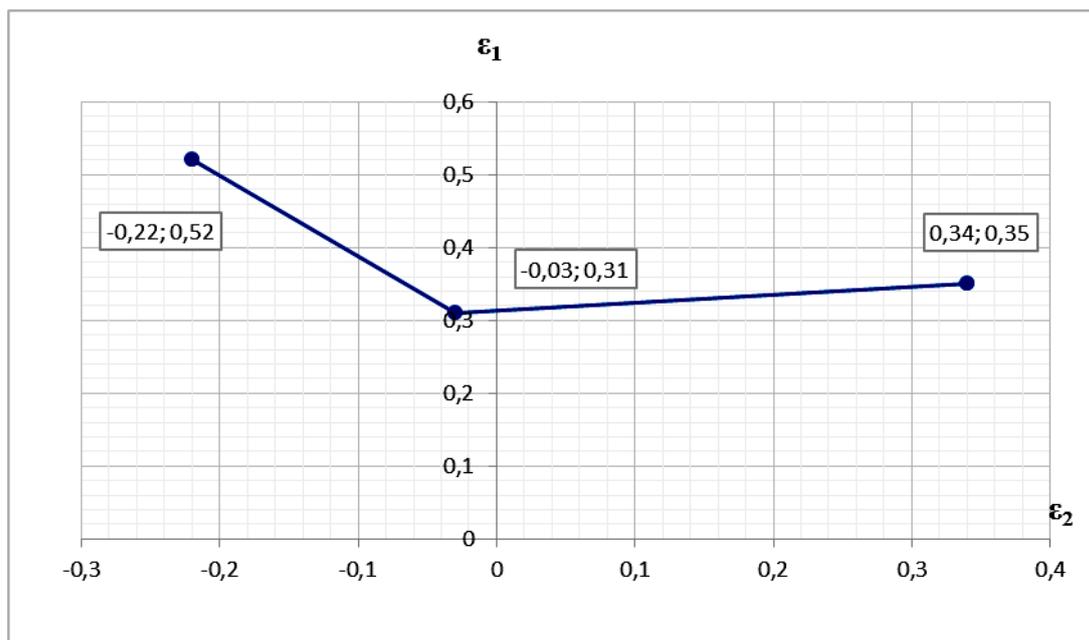


Рисунок 7. Кривая предельных деформаций для стали 08пс

3. Заключение. В результате проведенных испытаний экспериментально была построена кривая предельных деформаций для стали 08пс, которая может быть использована в дальнейших исследованиях при моделировании процесса листовой штамповки численными методами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки / А. В. Власов, С. А. Стебунов, С. А. Евсюков [и др.]. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – 384 с. – ISBN 978-5-7038-5101-2.
2. Зародов, М. С. Анализ технологических процессов штамповки теплообменных панелей / М. С. Зародов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 292-297.
3. ISO 12004-1 Metallic materials — Sheet and strip — Determination of forming-limit curves — Part 1: Measurement and application of forming-limit diagrams in the press shop.
4. ISO 12004-2 Metallic materials - Sheet and strip - Determination of forming-limit curves — Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory.
5. Изосимова, С. В. Исследование влияния формы заготовки на точность построения диаграммы предельных деформаций / С. В. Изосимова // Молодежный научно-технический вестник. – 2013. – № 10. – С. 3.

Поступила в редколлегию 28.06.2023 г.

УДК 621.0481

¹Е. Н. Колганова, канд. техн. наук, ²Е. П. Мельникова, д-р техн. наук, проф.,¹В. А. Лебедев, канд. техн. наук, проф., ¹А. П. Шишкина, канд. техн. наук.¹Донской государственной технической университет (ДГТУ), Россия²Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), ДНРТел./Факс: +7 (909) 430-95-99; E-mail: elenkolg@list.ru

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

В статье рассмотрены вопросы конструкторско-технологического проектирования сигнализатора протечек теплоносителя (СП) атомных электростанций. Предложено последовательное выполнение операций сборки СП, регламентируемой маршрутной картой единичного технологического процесса. Выполнен анализ требований к технологичности СП. Установлены причины не позволяющие обеспечить выполняемость требований в конструкции СП. Разработан общий алгоритм, включающий в себя ряд взаимообуславливающих функциональных блоков, реализующих процесс проектирования и сборки СП, обеспечивающей требуемое по условиям эксплуатации качество. Предложена модель одноступенчатого размерного анализа.

Ключевые слова: сигнализатор протечек, технологичность, конструкторско-технологическое обеспечение, проектирование

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

DEVELOPMENT OF MEASURES TO IMPROVE THE DESIGN AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THE MANUFACTURE OF PRODUCTS

The article deals with the issues of design and technological design of the coolant leak detector (SP) of nuclear power plants. The sequential execution of joint venture assembly operations regulated by the route map of a single technological process is proposed. The analysis of the requirements for the manufacturability of the joint venture is carried out. The reasons that do not allow to ensure the fulfillment of the requirements in the design of the joint venture are established. A general algorithm has been developed that includes a number of mutually reinforcing functional blocks that implement the process of designing and assembling a joint venture that provides the quality required by the operating conditions.

Keywords: duct alarm, manufacturability, design and technological support, design

1. Введение

Эксплуатационные качества машины окончательно формируются в процессе ее сборки. Качество сборки изделия определяется совокупностью большого количества различных показателей, среди которых традиционно доминируют геометрические (точность размеров, геометрической формы, взаимного расположения и контактирования сопрягаемых поверхностей и сборочных элементов, зазоры, натяги и т.д.). Это объясняется тем, что геометрические показатели, кроме того, что важны сами по себе, еще и коррелируют со многими другими параметрами качества машины. Таким образом, работоспособность изделия определяется характером взаимодействия исполнительных поверхностей его деталей, которое принято формализовано отражать в виде взаимосвязей размерных параметров или размерными цепями [4].

При проектировании изделий, эксплуатируемых в условиях повышенного воздействия вибраций разработчик сталкивается с необходимостью обеспечения их виброустойчивости. Наибольшее количество отказов изделий приходится на долю механических

факторов воздействия, поэтому повышение их надежности является важной научно-практической задачей, качество решения которой напрямую зависит от глубины пони-

мания тех механизмов, которые происходят под воздействием вибрационных нагрузок. При воздействии вибрационных нагрузок, имеющих широкий диапазон частот, в изделиях могут возникнуть изгибные, поперечные, продольные и поверхностные волны, которые распространяясь по материалу конструкции, ускоряют процессы разрушения. Даже те элементы изделий, дефекты которых в обычных условиях не проявляются, могут оказаться крайне чувствительными по отношению к слабым вибрациям (точечная сварка и др.) [3].

Технические материалы, на первый взгляд кажущиеся однородными, всегда содержат большое количество дефектов различного происхождения и самых разнообразных размеров. На субмикроскопическом уровне это вакансии включения в почти правильной структуре материала, дислокации, поры. На микроскопическом уровне наблюдается разброс в ориентации, размерах и свойствах частиц, образующих материал. На микроскопическом уровне различны уже свойства материала ввиду неоднородности большого масштаба.

При действии циклически изменяющихся напряжений, создаваемых вибрацией, наблюдается явление усталости материалов. На усталостную прочность материала оказывают существенное влияние два фактора: повторность нагрузки и фактор времени. При циклическом нагружении распространение пластической деформации характеризуется волновым процессом, скорость которого определяется по динамической диаграмме напряжение – деформация. В связи с тем, что пластическая прочность материала понижается по мере увеличения степени деформации, при дальнейшем воздействии циклической знакопеременной нагрузки приведет к образованию субмикроскопических трещинок, расположенных вдоль определенных линий или полос скольжения. Трещины усталости распространяются не по всему объему изделия, подвергающемуся циклическим напряжениям, а только по одному из сечений, в котором она проходит по наиболее слабым элементам материала, в большинстве своем имеющим неоднородную структуру, следовательно, в этом сечении концентрируется наибольшее местное напряжение.

Одной из основных характеристик материала при воздействии на него циклических нагрузок является циклическая вязкость, которая не является постоянной величиной, так как зависит от величины циклических напряжений и от нарастания числа циклов напряжения; эти изменения циклической вязкости, характеризуемые изменением петли гистерезиса, позволяют констатировать в металле под действием циклических нагрузок наличие одновременно протекающих двух факторов: фактора упрочнения, за который принимается наклеп и механическое старение материала, вызываемые его пластической деформацией; разупрочняющего фактора, за который принимаются остаточные напряжения в материале.

Ход всякого усталостного процесса материала зависит от сравнительной интенсивности обоих факторов, меняющихся по мере нарастания числа циклов нагружения и их частоты. Степень влияния частоты нагружения на характеристики усталостной прочности материала зависит от материала, характера нагружения, уровня напряжений (отношения максимального напряжения цикла к пределу упругости), наличия концентраций напряжения, окружающей среды, температуры.

Происходящие под воздействие вибраций в материалах элементов изделия структурно фазовые преобразования, приводящие к изменению их напряженного состояния, определяют снижение надежности, нарушению геометрической точности изделий и, как следствие, к утрате их функциональных функций. В настоящее время вопрос взаимосвязи качества изделий с их эксплуатационными свойствами и, в частно-

сти, с обеспечением вибростойкости не получил должного разрешения. Поэтому задача учета этих факторов на стадии конструкторско-технологической проработки изделий, эксплуатируемых в условиях повышенного воздействия, является актуальной, имеющей важное научное и практическое значение для повышения их работоспособности.

2. Основное содержание и результаты работы

Сборка – завершающий, трудоемкий и дорогостоящий технологический процесс, во многом определяющий эксплуатационные характеристики, себестоимость изготовления и конкурентоспособность любого изделия, а тем более электромеханических датчиков. Проблема улучшения качества выпускаемых изделий, снижения затрат на их изготовление и сокращения сроков подготовки серийного производства особенно актуально проявляется на современном этапе развития приборостроения. Необходимость обеспечения постоянной конкурентоспособности на насыщенном мировом рынке диктует частую смену продукции данной отрасли. Это требует разработки и применения самых современных технологических процессов сборки, наиболее совершенного оборудования и оснастки, жесткого сквозного контроля, рационального решения вопросов обеспечения точности и взаимозаменяемости при непрерывно сокращаемых сроках подготовки производства новых изделий [3, 4].

Целью исследований является разработка технологических принципов и расчётных моделей, обеспечивающих на этапе проектирования и изготовления вибростойкость электромеханических датчиков и выработка на этой основе рекомендаций по внедрению их в конструкторско-технологическую практику.

Для достижения поставленной цели рассмотрим процесс проектирования сигнализатора протечек теплоносителя (СП) атомных электростанций. Сигнализатор протечек, является элементом, обеспечивающим нормальную, безопасную эксплуатацию реактора в экстремальных условиях, и предназначен для контроля протечек теплоносителя в узлах уплотнения фланцевых разъёмов блока верхнего реактора.

Изготовление СП регламентируется маршрутной картой единичного технологического процесса общей сборки, предусматривающей последовательное выполнение следующих операций:

1. Сборка и регулировка подвижного контакта;
2. Соединение сваркой корпуса в сборе с подвижным контактом, мембраной и стаканом;
3. Гидроиспытание сварного шва и контроль его герметичности;
4. Сборка корпуса неподвижного контакта;
5. Установка неподвижного контакта в корпус СП и его фиксация в требуемом положении, установленном ТУ;
6. Испытания СП на работоспособность.

Не раскрывая детали содержания операций, прописанных в технологическом регламенте, следует отметить ряд основных факторов, свидетельствующих о их неэффективности. Во-первых, несмотря на общий регламент изготовления, для каждого изделия требуется индивидуальный подход при выполнении пригоночно - регулировочных работ. Во-вторых, следует отметить не проработанность вопросов фиксации ряда деталей в изделии, определяющих надёжность работы изделия при эксплуатации.

В основном, детали сигнализатора относятся к телам вращения с осевым отверстием, в которое входит сопрягаемая деталь (втулка). Основным техническим требованием при изготовлении деталей данного типа является концентричность наружных и внутренних поверхностей и перпендикулярность одной или обеих

торцовых поверхностей втулки ее оси. Детали имеют наружную ступенчатую поверхность, наружные и внутренние поверхности - цилиндрические.

Детали: корпус, вкладыш и корпус контакта изготавливаются из жаропрочного сплава ХН35ВТ-ВД. Детали: стакан, толкатель, пробка и чашка производятся из коррозионностойкой жаропрочной стали 08Х18Н10Т. Данные сплавы применяются для изготовления деталей и узлов основного оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок с водяным теплоносителем. Сталь 08Х18Н10Т отличается хорошей свариваемостью, а, в свою очередь, сплав ХН35ВТ-ВД относится к трудносвариваемым. Таким образом, данные сплавы подходят для условий работы сигнализатора протечек теплоносителя.

Размерный анализ является важным этапом в процессе подготовки производства к выпуску новой продукции. Он позволяет обеспечить требуемую точность функциональных параметров изделий. При этом размерный анализ является связующим звеном между конструкторскими и технологическими работами. При проектировании устанавливаются и закладываются в конструкции взаимосвязи между параметрами качества изделия с одной стороны и эксплуатационными характеристиками и параметрами самой конструкции с другой. Задачей технолога является реализация разработанных требований конструктора при изготовлении машины с учетом критерия минимальной себестоимости.

При эксплуатации размерные связи не остаются постоянными. На изделие будут воздействовать внешние и внутренние факторы, которые приводят к потере точности. Такие воздействия необходимо учитывать при комплексном обеспечении точности в виде эксплуатационных размеров, которые описывают дополнительные размерные связи, возникающие при эксплуатации изделия. Включение эксплуатационных размеров в конструкторские размерные цепи позволяет обеспечивать требуемую точность функциональных параметров в течение заданной долговечности изделия.

На рис. 1-4 приведены размерные связи, обеспечивающие выполнение СП своего функционального назначения с учётом рекомендуемых конструктивных изменений, которые могут быть положены в основу традиционного размерного анализа.

Проведение традиционного размерного анализа позволяет добиться требуемой точности при изготовлении детали. Однако без учета эксплуатационных процессов нельзя обеспечить точность изделия в течение заданной долговечности. Поэтому важным при проведении размерного анализа конструкций машин представляется учет износа и деформаций (контактных, тепловых, статических) составляющих звеньев и влияние этих и других эксплуатационных явлений на точность исходного (замыкающего) звена.

Предметом оценки конструкции СП на технологичность в соответствии с техническим заданием на выполнение работ, являлась его производственная технологичность. Анализ конструкции СП на технологичность проводился в соответствии с ГОСТ 14.201-83 «Технологичность конструкции. Термины и определения», ГОСТ 2.116-84*, ГОСТ 14.205-83 «Правила обеспечения технологичности конструкции изделия», который позволил установить следующее.

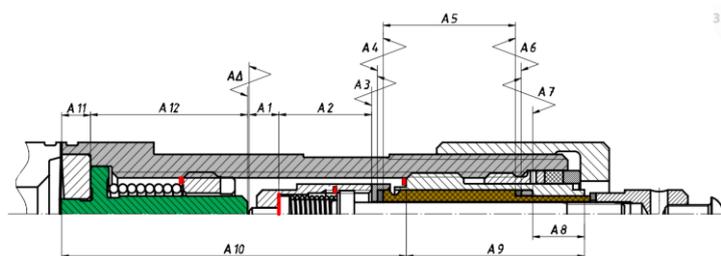


Рисунок 1. Схема размерной цепи **А**, обеспечивающей при сборке достижение точности зазора между исполнительными поверхностями СП

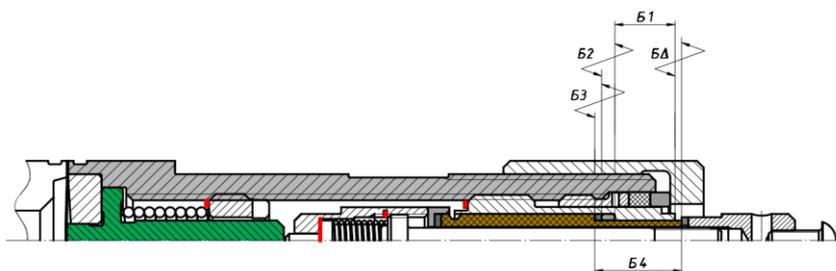


Рисунок 2. Схема размерной цепи **Б**, обеспечивающей при сборке СП достижение точности выступа изолятора за пределы его корпуса

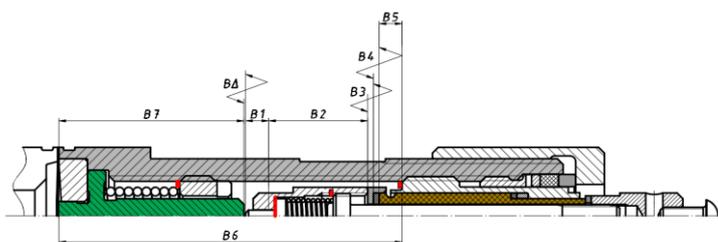


Рисунок 3. Вариант схемы размерной цепи **В**, обеспечивающей при сборке достижение точности зазора между исполнительными поверхностями СП

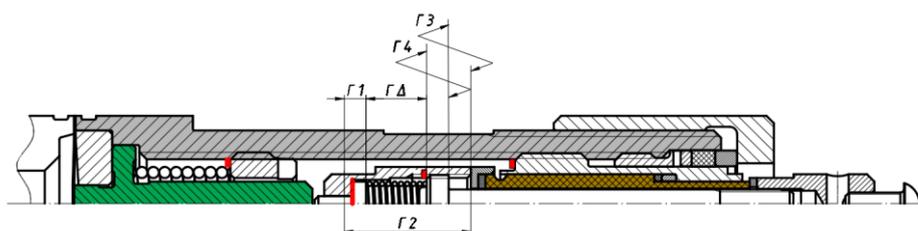


Рисунок 4. Схема размерной цепи **Г**, обеспечивающей расчет точности упруго элемента неподвижного контакта СП

В качестве очевидных преимуществ СП, определяющих его технологичность, можно выделить:

- простоту формы СП и входящих в него деталей - все они являются телами вращения, что позволяет их изготовить на станках токарной группы нормальной точности;
- наличие базовой детали, роль которой выполняет корпус;
- простоту ориентации деталей относительно друг друга;

Таблица 1. – Анализ требований к технологичности СП

Требования к технологичности конструкции	Причины не позволяющие обеспечить выполняемость требований в конструкции СП
Требования к составу СЕ	
Обеспечение сборки без применения регулировочных и пригоночных работ	Требования КД и технологического регламента изготовления СП
Удобный доступ к местам сборки, контроля, регулировки и пригонки	Конструктивные особенности СП
Простота компенсирующих устройств и удобство пользования ими	В конструкции СП отсутствуют
Проведение сборки и регулировки без промежуточной разборки и повторных сборок составных частей	Технологический регламент изготовления СП
Использование конструкторских баз в качестве технологических и измерительных	Технологический регламент изготовления СП
Взаимозаменяемость	Индивидуальный подход при настройке СП, разная точность деталей
Регулируемость конструкции	На этапе эксплуатации не возможна
Контролепригодность конструкции при эксплуатации	На этапе эксплуатации не возможна
Инструментальная доступность конструкции	Конструктивные особенности СП
Возможность компоновки из стандартных и унифицированных деталей	Все детали специальные
Компоновка сборочной единицы обеспечивается общей сборкой без промежуточной разборки и повторных сборок составных частей;	Технологический регламент изготовления СП
Наличие устройств, обеспечивающие заданную точность относительного расположения составных частей (центрирующие, фиксирующие, компенсирующие)	Технологическим регламентом не предусмотрены
Пределы регулирования и параметры компенсаторов рассчитываются на основе теории размерных цепей.	Технологический регламент изготовления СП не предусматривает
Требования к сопряжениям деталей СЕ	
Потребность в специальных приспособлениях для осуществления соединений (сжатие тугих пружин, запрессовка, развальцовка и т.д.) должна быть сведена к минимуму	Технологический регламент изготовления СП
Соединения не должны требовать дополнительной обработки в процессе сборки	Технологический регламент изготовления СП
В прессовых соединениях длина запрессовки должна быть минимальной	Прессовые соединения отсутствуют
Сборка деталей по двум посадочным поверхностям должна быть не одновременной, а последовательной	Подобного типа соединения отсутствуют
Желательно, чтобы способ стопорения был не трудоемким и допускал разборку и повторную сборку соединения	Технологический регламент изготовления СП

- отсутствие высокой точной обработки сопрягаемых поверхностей соединения составных частей;

- возможность расчленения на составляющие СЕ;

- преобладание подвижных, разъемных соединений;

- контролепригодность на этапе изготовления;
- точность и шероховатость сопрягаемых поверхностей соответствуют требуемой прочности неподвижных и износостойкости подвижных соединений;
- до окончания процесса сборки детали фиксируются относительно друг друга без дополнительного крепления.

Вместе с тем, как представлено в табл. 1, по ряду факторов конструктивное исполнение СП не обеспечивает выполнение требований к технологичности, предусмотренными вышеуказанными ГОСТами.

Наличие более 50% нереализованных требований к технологичности конструкции СП показывает, что конструктивное исполнение нуждается в совершенствовании и улучшении, особенно в части мероприятий, направленных на снижение уровня работ, связанных с пригонкой и регулировкой. Это особенно важно при организации серийного выпуска СП.

Особую сложность вызывают испытания СП на виброустойчивость из-за отсутствия технических средств, обеспечивающих показатели, установленных к нему техническими требованиями [1, 2]. В этой связи, вполне успешно, с достаточно высокой степенью достоверности, может быть использована, в частности, программа компьютерного моделирования Creo Simulate, предназначенная для решения широкого круга задач методом конечных элементов, и позволяющая численно исследовать вибрационный и ударный отклик деталей СП [5, 6]. Весь процесс решения задачи вибрационного анализа СП в программе Creo Simulate можно разделить на несколько этапов: подготовка расчетной модели, настройка взаимосвязи элементов модели, задание свойств материалов и граничных условий (ограничений и нагрузок), генерация сетки, разрешающей характерные масштабы колебаний, расчет проекта и постобработка результатов. После проведения анализа и выявления проблемных областей возможно, на основе вероятных решений, внести необходимые изменения в конструкцию изделия, и снова запустить анализ для дополнительного моделирования и определения результативности принятых решений.

3. Общий алгоритм и рекомендации

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм, включающий в себя ряд взаимообуславливающих функциональных блоков (рис.5), реализующих процесс проектирования и сборки СП, обеспечивающей требуемое по условиям эксплуатации качество.

Осуществление рекомендуемой технологической схемы сборки СП предполагает: на общую сборку входящие в состав изделия СЕ поступают полностью собранными и проверенными; конструкция СЕ не допускает их частичную разборку и регулировку на базовой детали

Для обеспечения этого условия рекомендуется:

1. Расчет точности деталей СП, подлежащих изготовлению и обеспечивающих его функциональное назначение, провести с использованием размерного-точностного анализа, реализующего проектирование, а также устанавливающего связь эксплуатационных параметров и технологии изготовления;

2. Для оценки виброустойчивости СП в экстремальных условиях эксплуатации применить программный пакет компьютерного моделирования Creo Simulate.

Применяя теорию размерного анализа конструкций, можно связать ряд этапов конструкторско-технологической подготовки изготовления изделия. На рис. 6 приведена блок-схема обеспечения точности изделия в процессе конструкторско-технологической подготовки производства.

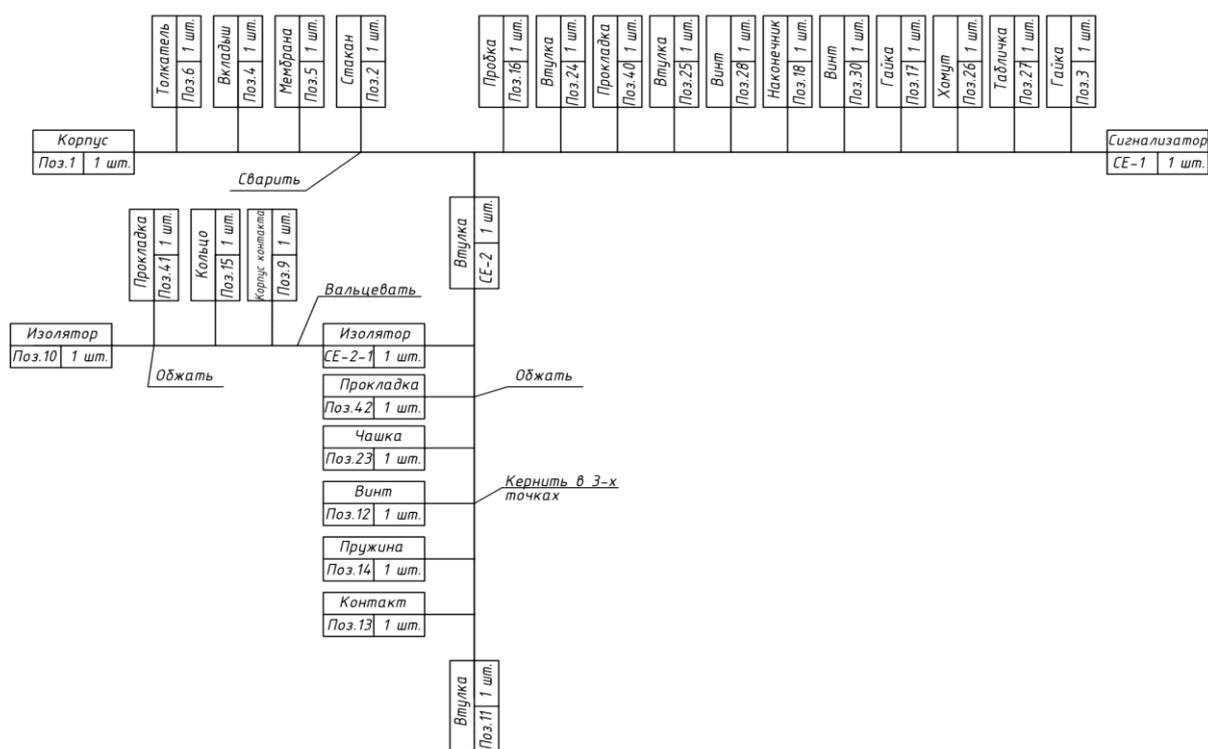


Рисунок 5. Технологическая схема общей сборки СП

В качестве основных этапов управления точностью изделия выделяют следующие: анализ требований, предъявляемых к изделию, и определение параметров замыкающих звеньев; построение размерных цепей, формирующих необходимые замыкающие (исходные) звенья; предварительная оценка сложности обеспечения требуемой точности замыкающего звена; выбор метода обеспечения точности замыкающего звена; анализ конструкторских размеров с заменой наиболее ответственных или сложных в изготовлении на соответствующие технологические размеры; анализ функционального назначения деталей и их отдельных поверхностей с добавлением необходимых эксплуатационных звеньев; решение построенной размерной схемы и определение всех параметров и мероприятий, необходимых для изготовления и эксплуатации изделия в течение требуемого срока службы.

Любой размер определяет положение одних деталей относительно других деталей (элементов технологической оснастки) или относительное положение различных поверхностей одной и той же детали. В результате в общем виде размер изделия можно представить в виде системы исходных размеров.

$$A_{\text{факт}} = \sum S + \sum \Delta_{\text{изг}} + \sum I_{\text{экс}} \tag{1}$$

где $A_{\text{факт}}$ - конструкторские размеры; $\sum S$ - система технологических размеров, определяемая схемами базирования на технологических операциях в процессе изготовления детали (настроечный размер); $\sum \Delta_{\text{изг}}$ - элементарные погрешности изготовления; $\sum I_{\text{экс}}$ - погрешности, появляющиеся при эксплуатации машины.

Предложенная модель одноступенчатого размерного анализа позволяет реализовать процесс обеспечения заданной точности изделия путем комплексного расчета

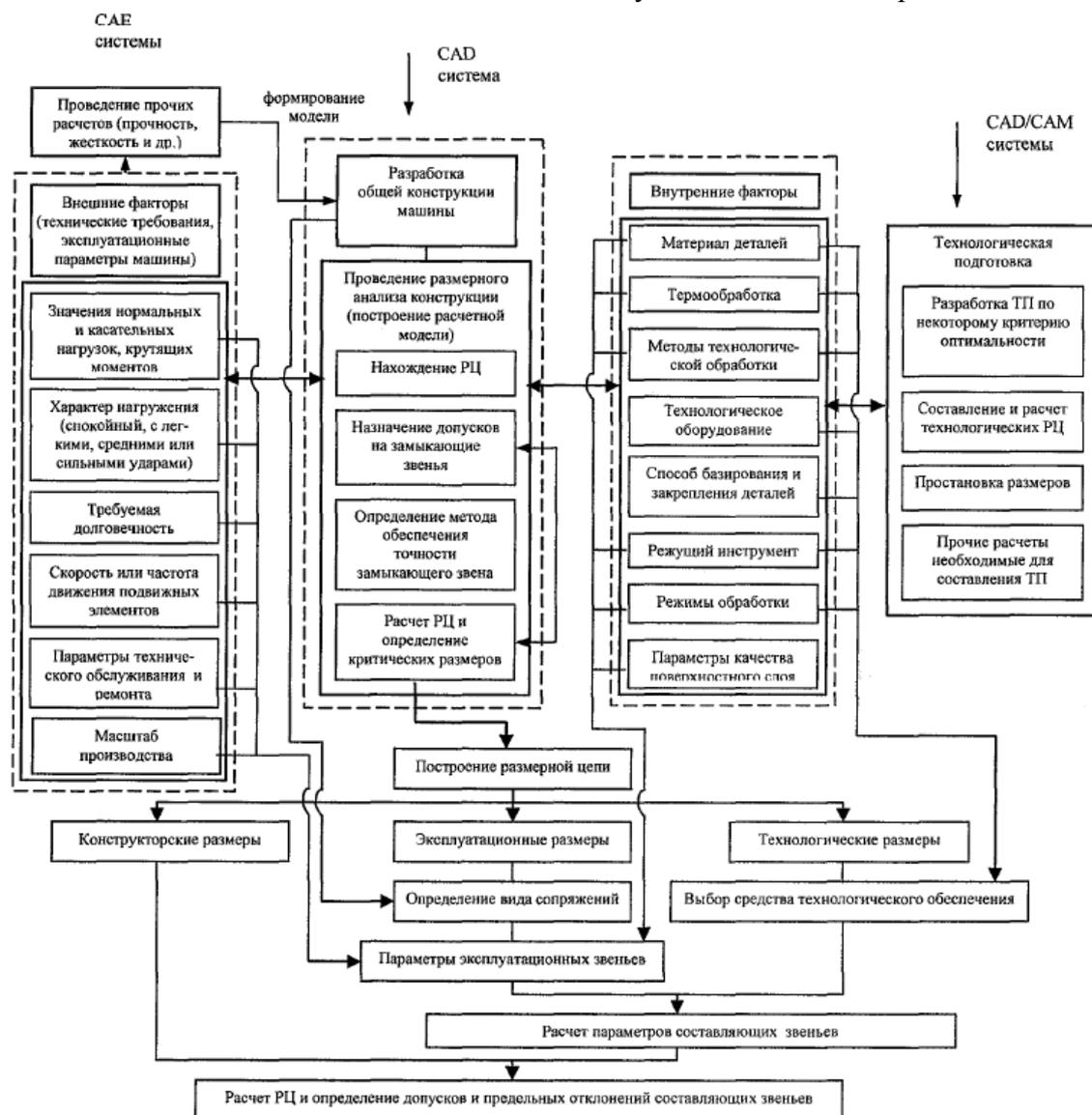


Рисунок 6. Обеспечение точности изделия в процессе конструкторско-технологической подготовки производства

размерных связей с учетом обеспечения требуемой работоспособности изделия (точность замыкающего звена сборочной размерной цепи), условий его эксплуатации, а также учетом проектируемой технологии изготовления и сборки (выбор технологических баз и расчет точности межоперационных размеров, учет погрешностей обработки).

Модель позволяет проводить расчет точности функциональных размеров отдельных конструктивных элементов деталей с анализом отклонений формы и расположения контактирующих поверхностей, изменения размеров при эксплуатации (износ, контактные деформации, вибрации и др.), а проектирование операционных размеров увязывается с типом применяемого оборудования (универсальное, копировальное, с ЧПУ и др.).

Рассмотренная общая модель является основой для проведения размерно-точностного анализа изготовления СП с учетом его функционального назначения и условий эксплуатации с применением компьютерного моделирования.

4. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Выполнить анализ требований к технологичности СП. Установить причины, не позволяющие обеспечить выполняемость требований в конструкции СП.

2. Разработать общий алгоритм, включающий в себя ряд взаимообуславливающих функциональных блоков, реализующих процесс проектирования и сборки СП, обеспечивающий требуемое по условиям эксплуатации качество.

3. Предложить модель одноступенчатого размерного анализа.

Результаты проведенных исследований и предложенные для практического применения мероприятия позволяют улучшить конструкторско-технологического обеспечение изготовления сигнализатора протечек теплоносителя атомных электростанций.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Колганова, Е. Н. Технологическое обеспечение вибрационной обработки деталей, имеющих малые пазы и отверстия [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 2.5.6 (05.02.08) Технология машиностроения / Е.Н. Колганова. – Ростов н/Д, 2022. – 169 с.

2. Повышение эффективности вибрационной обработки путем комбинирования обрабатываемых сред / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, Ю. В. Корольков, В. М. Троицкий // Научные технологии в машиностроении. – 2021. – № 6(120). – С. 12-17. – DOI 10.30987/2223-4608-2021-6-12-17. – EDN VTCTWS.

3. Польский, Е. А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностей деталей машин при проектировании маршрутно-операционного технологического процесса методом синтеза на основе анализа размерных связей / Е. А. Польский // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №10 (64). – С. 39 – 48.

4. Суслов, А. Г. Научная технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла / Суслов А. Г., Федонин О. Н., Польский Е. А. // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – №5 (59). – С. 34 – 42.

5. Тамаркин, М. А. Обоснование гранулометрических характеристик рабочей среды при вибрационной обработке деталей с малыми пазами и отверстиями. / Тамаркин М. А., Колганова Е. Н., Ягмуров М. А. // Advanced Engineering Research. – 2020. – 20(4). – С. 382-389.

6. Эффективность применения гранулированных сред из природных материалов для виброотделки деталей радиоэлектронной аппаратуры / М. А. Тамаркин, Е. Н. Колганова, В. А. Лебедев, А. П. Шишкина // Воронежский научно-технический Вестник. – 2021. – Т. 4. – № 4(38). – С. 59-69. – DOI 10.34220/2311-8873-2022-59-69. – EDN LTQYNQ.

Поступила в редколлегию 22.03.2023 г.

УДК 620.178

В. Н. Кудрявцев, канд. техн. наук, доц., **В. А. Парамонова**, канд. техн. наук, доц.
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия
Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-
Барановского, ДНР, Россия
Тел./Факс: +7981-806-89-79; E-mail: kudryavtsevvn@mail.ru

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ НОРМАЛИЗОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В работе представлены модели для расчёта основных механических свойств нормализованных сталей (допускаемые напряжения - среза, кручения, растяжения, изгиба и смятия, а также пределы текучести и прочности при растяжении) от содержания в их составе углерода, полученные аналитическими и расчётными методами при обработке справочных таблиц. Отмечено практически полное совпадение кривой твёрдости для нормализованной стали (в единицах твёрдости HB) и кривой, описывающей допускаемое напряжение изгиба (МПа).

Ключевые слова: нормализованная сталь, содержание углерода, механические свойства.

V.N. Kudryavtsev, V.A. Paramonova

COMPUTATIONAL MODELS FOR DETERMINING THE MECHANICAL PROPERTIES OF SOME NORMALIZED STEELS

Annotation The paper presents models for calculating the basic mechanical properties of normalized steels (allowable stresses - shear, torsion, stretching, bending and crumpling, as well as yield strength and tensile strength) from the carbon content in their composition, obtained by analytical and computational methods when processing reference tables. An almost complete coincidence of the hardness curve for normalized steel (in units of hardness HB) and the curve describing the allowable bending stress (MPa) is noted.

Keywords: normalized steel, carbon content, mechanical properties.

1. Введение

Одним из важных этапов проектирования различных конструкций, машин и аппаратов является расчёт обеспечения их прочности. Оценка возможности развития в несущих элементах конструкций различных видов разрушений (износ; деформации и изломы; химико-тепловые; электрофизические и электрохимические повреждения) осуществляется на этапе их проектирования (путём принятия коэффициентов запаса).

Среди основных механических свойств материалов особое внимание уделяют различным видам прочности и пределу прочности, пределу текучести, жёсткости и твёрдости.

Для описания материалов, обладающих упругими свойствами, применяют такое свойство как предел текучести, характеризующийся максимальным растягивающим напряжением, которое материал может выдержать до необратимой деформации.

Способность тела (конструктивного элемента) оказывать сопротивление упругой деформации при приложении нагрузки характеризует величина жёсткости.

Значения твёрдости поверхности деталей конструкции, выраженные через сопротивление внедрению более твёрдого тела, характеризуют устойчивость к локализованной деформации поверхности.

Прочность характеризует величину напряжения, которое может быть приложено к телу с целью его деформации или поломки. Максимальное значение напряжения, при котором возникает разрушение тела, принято называть пределом прочности σ_B .

Способность материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих под воздействием внешних сил, как правило, оценивают по значениям прочности материала, из которого изготовлена деталь [1].

Основные механические характеристики материалов конструкций позволяют прогнозировать срок их эксплуатации, долговечность, износостойкость рабочих узлов и другие эксплуатационные характеристики, что играет существенную роль при проектировании различных видов оборудования, включая машины и аппараты для пищевой промышленности, работающие в условиях агрессивных сред [2, 3, 4].

Для определения таких прочностных свойств материалов как предел упругости, предел текучести и предел прочности (временное сопротивление) проводят испытания на статические нагрузки, при этом определение прочности осуществляют тестированием шаблонных образцов (круглой или прямоугольной формы). По результатам исследований строится диаграмма, показывающая зависимость деформации образца от прикладываемого напряжения. Методы механических испытаний материалов регламентируют соответствующие стандарты, среди которых ГОСТ 9454-78, ГОСТ 25.503-97, ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84), ГОСТ 25.502-79 и др. [3, 4, 5, 6, 7].

Следует отметить, что все механические свойства зависят как от состава материала, так и от способа его обработки, при этом основные свойства сталей (допускаемые напряжения растяжения, среза, изгиба, кручения, смятия и твёрдость) являются взаимозависимыми и взаимообусловленными.

Целью статьи является получение моделей с упрощённым расчётным аппаратом для расчёта основных механических свойств нормализованных сталей (допускаемые напряжения - среза, кручения, растяжения, изгиба и смятия, а также пределы текучести, прочности при растяжении и твёрдости) от содержания в их составе углерода во взаимообусловленном контексте.

2. Основное содержание и результаты работы

Для достижения поставленной цели использовали аналитические и расчётные методы при обработке справочных таблиц, поиск закономерностей выполняли при помощи Пакета анализа MS Excel и MathCAD.

Конструктивные элементы машин и аппаратов, изготовленные из различных материалов и видов сталей, в частности, в процессе эксплуатации, часто, подвергаются значительным нагрузкам силой (силами) и/или моментом (моментами), приводящими к возникновению напряжений растяжения, сжатия и другим видам напряжений как нормального, так тангенциального и смешенного направлений. Воздействующие на детали и узлы усилия могут быть статическими и динамическими. Также значительную роль при создании напряжений играют моменты. В связи с этим, для обеспечения долговечности и прочности машин и аппаратов на этапе проектирования выбирают наиболее подходящие по механическим свойствам материалы, соответствующие запланированным эксплуатационным нагрузкам с необходимым запасом прочности.

Для получения гармонизированных и взаимообусловленных данных по характеристикам сталей, в работе был проведён анализ справочных данных структурированных в таблицы для нормализованных сталей [5, 6]. Для анализа изменения механических свойств нормализованных сталей от количества углерода в их составе, справочные данные были сведены в табл. 1. При данном анализе материаловедческая информация о структурных изменениях материала при термической обработке сведена к минимуму.

На рис. 1 приведены графики, построенные по данным основных механических свойств нормализованных сталей (допускаемые напряжения, МПа – среза $\sigma_{ср}$, кручения

$\sigma_{кр}$, растяжения σ_p , изгиба $\sigma_{изг}$ и смятия $\sigma_{см}$, а также пределы текучести σ_m , прочности при растяжении σ_b и твёрдости сталей по НВ) от содержания в их составе углерода. Для удобства совместного анализа на одном графике, величины приведены к одинаковой размерности (пояснение к столбцу твёрдости и коэффициенту в этом столбце).

Таблица 1. – Механические свойства некоторых марок нормализованных сталей

Марка	C, %·10 ²	$\sigma_{ср}$, МПа	$\sigma_{кр}$, МПа	σ_p , МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	$\sigma_{см}$, МПа	Твёрдость НВ×10 ⁻¹ , МПа (без терм обр)	σ_b , МПа	σ_T , МПа
Сталь 8	8	58,84	78,45	107,87	127,49	161,81	131	320	196
Сталь 10	10	63,74	78,45	107,87	142,20	161,81	143	330	205
Сталь 15	15	73,55	93,16	122,58	147,10	181,42	149	370	225
Сталь 20	20	83,36	102,97	137,29	166,71	205,94	163	410	245
Сталь 25	25	88,26	107,87	147,10	176,52	215,75	170	450	275
Сталь 30	30	98,07	122,58	161,81	196,13	235,36	179	490	295
Сталь 35	35	107,87	132,39	176,52	205,94	264,78	207	530	315
Сталь 40	40	112,78	137,29	186,33	225,55	274,59	217	570	335
Сталь 45	45	122,58	147,10	196,13	235,36	294,20	229	600	355
Сталь 50	50	122,58	156,91	205,94	245,17	304,01	241	630	375

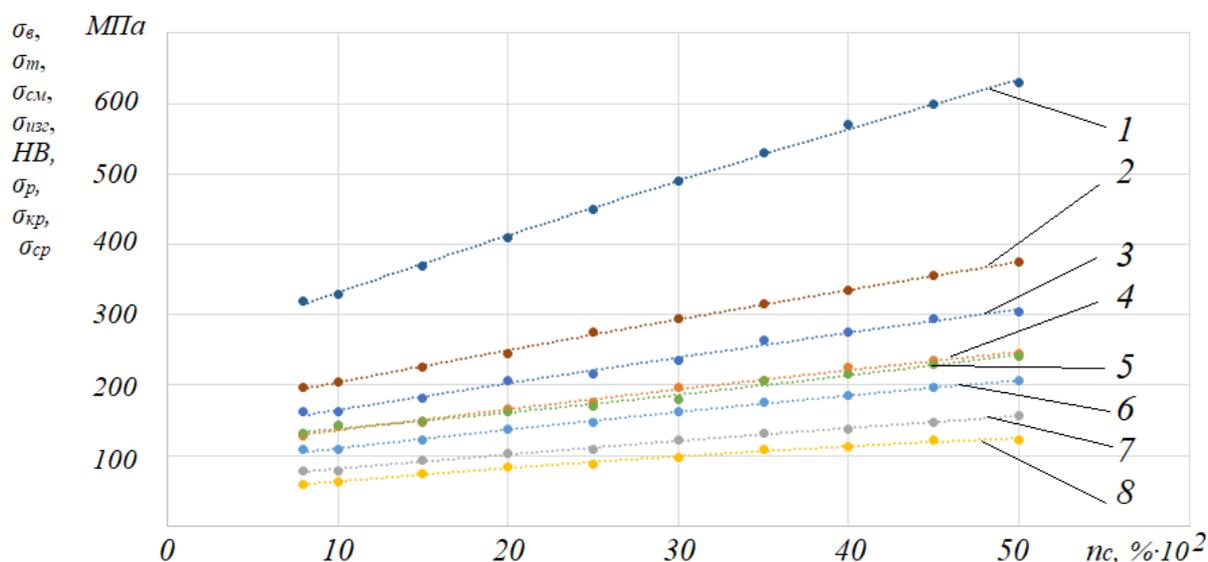


Рисунок 1. График зависимости механических свойств нормализованных сталей от содержания в их составе углерода:

1 – σ_b , 2 – σ_m , 3 – $\sigma_{см}$, 4 – $\sigma_{изг}$, 5 – НВ, 6 – σ_p , 7 – $\sigma_{кр}$, 8 – $\sigma_{ср}$

Данные зависимости, как известно, носят натуральнологарифмический характер, что усложняет расчётный аппарат. Возможно применение линейнографической аппроксимации, однако при этом возрастает погрешность полученных расчётных величин. Для упрощения расчёта и сохранения точности полученных данных целесообразно использование параболических зависимостей. Это подтверждено сравнительным анализом множественных коэффициентов корреляций.

По полученным графикам, с учётом выше изложенного, были построены аппроксимирующие сглаживающие кривые, уравнения которых представлены формулами (1)-(8) (величина достоверности аппроксимации кривых для всех зависимостей $R^2 = 0,98$):

$$\sigma_{\sigma} = -0,0189 \cdot n_C^2 + 8,6939 \cdot n_C + 246,59 \quad (1)$$

$$\sigma_m = -0,0095 \cdot n_C^2 + 4,8479 \cdot n_C + 156,47 \quad (2)$$

$$\sigma_{\sigma_{\text{см}}} = -0,0073 \cdot n_C^2 + 4,0128 \cdot n_C + 125,45 \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{изг}} = -0,0059 \cdot n_C^2 + 3,1365 \cdot n_C + 105,31 \quad (4)$$

$$HB = -0,0111 \cdot n_C^2 + 1,9656 \cdot n_C + 117,5 \quad (5)$$

$$\sigma_p = -0,0081 \cdot n_C^2 + 2,9083 \cdot n_C + 81,938 \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{кр}} = -0,0057 \cdot n_C^2 + 2,2137 \cdot n_C + 59,642 \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{ср}} = -0,0124 \cdot n_C^2 + 2,2824 \cdot n_C + 41,661 \quad (8)$$

Как видно из графиков механических свойств нормализованных сталей наименьшее сопротивление нормализованные стали оказывают процессу резания и более эффективно материал сопротивляется смятию.

Следует особо отметить, что графики, характеризующие допустимое напряжение изгиба и твёрдость нормированных сталей по шкале Бринелля практически накладываются друг на друга, что может являться следствием применяемой для определения твёрдости методики – вдавливание шарика в поверхностный слой вызывает сопротивление аналогичное, возникающему при изгибе, что, в целом, позволяет применять для твёрдости размерность МПа и использовать для определения данных величин любое их полученных выражений (4) или (5). С целью проверки данного предположения аналогичные графики (рис. 2) и зависимости (9)-(14) были построены для нормализованных сталей, содержащих марганец Mn.

Для анализа изменения механических свойств нормализованных сталей, содержащих марганец Mn, от количества углерода в их составе, справочные данные были сведены в табл. 2.

Таблица 2. – Механические свойства некоторых марок нормализованных сталей

Марка	C, % · 10 ²	$\sigma_{\text{ср}}$, МПа	$\sigma_{\text{кр}}$, МПа	σ_p , МПа	$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	$\sigma_{\text{см}}$, МПа	Твёрдость HBx10 ⁻¹ , МПа (без терм обр)
Сталь 20Г	20	88,26	107,87	147,10	176,52	215,75	197
Сталь 30Г	30	107,87	132,39	176,52	205,94	264,78	217
Сталь 40Г	40	117,68	147,10	196,13	235,36	294,20	229
Сталь 50Г	50	127,49	156,91	205,94	254,97	313,81	255
Сталь 65Г	65	142,20	181,42	235,36	284,39	353,04	285

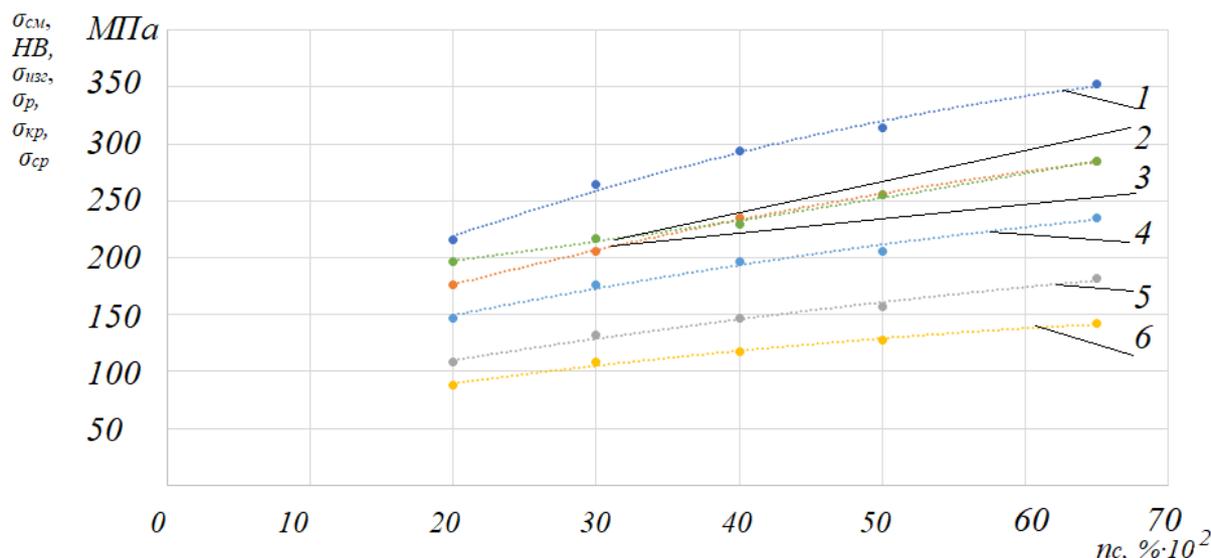


Рисунок 2. График зависимости механических свойств нормализованных сталей, содержащих марганец от содержания в их составе углерода:

1 – $\sigma_{см}$, 2 – HV , 3 – $\sigma_{изг}$, 4 – σ_p , 5 – $\sigma_{кр}$, 6 – $\sigma_{ср}$

Величина достоверности аппроксимации кривых для всех зависимостей $R^2 = 0,99$:

$$\sigma_{см} = - 0,0298 \cdot n_c^2 + 5,4557 \cdot n_c + 121,94 \tag{9}$$

$$\sigma_{изг} = - 0,0183 \cdot n_c^2 + 3,9506 \cdot n_c + 104,76 \tag{10}$$

$$HV = - 0,0076 \cdot n_c^2 + 1,3069 \cdot n_c + 168,44 \tag{11}$$

$$\sigma_p = - 0,0135 \cdot n_c^2 + 3,0188 \cdot n_c + 94,497 \tag{12}$$

$$\sigma_{кр} = - 0,0096 \cdot n_c^2 + 2,376 \cdot n_c + 66,252 \tag{13}$$

$$\sigma_{ср} = - 0,011 \cdot n_c^2 + 2,0851 \cdot n_c + 52,339 \tag{14}$$

Как видно из полученных графиков кривые твёрдости и допускаемого напряжения изгиба также сопоставимы, а небольшое отклонение данных при содержании углерода 0,2% и 0,3% может быть следствием получения данных из различных источников. Для целого ряда сталей часть значений по механическим свойствам в справочниках отсутствует, отсутствующие в справочниках [5, 6] данные для сталей, содержащих марганец Mn, были приняты по таблицам для проката ГОСТ 1577-93 (при этом в ГОСТ указаны максимально возможные значения твёрдости).

3. Заключение

Полученные в работе зависимости между механическими свойствами сталей и содержанием в ней углерода (в диапазоне от 0,08 % до 0,5% для конструкционных сталей и от 0,2% до 0,65% сталей с 1% содержанием марганца) целесообразно использовать на этапе эскизного проекта при конструировании различных машин и аппаратов, а также для прогнозирования характеристик сталей при различных несущественных отклонениях в технологии, либо других причинах изменения состава углерода в нормализованных сталях. Полученные зависимости позволяют упростить расчёты в САПР, исключая необходимость сопоставления данных в справочных источниках, включая базы данных для САПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tessa Axsom. Engineering Fundamentals Refresh: Strength vs. Stiffness vs. Hardness / Tessa Axsom // Resource Center Fictiv. Design guides, workflow tips, industry reports and more [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.fictiv.com/articles/engineering-fundamentals-refresh-strength-vs-stiffness-vs-hardness>
2. Кудрявцев, В. Н. Особенности проектирования элементов мясоизмельчительного оборудования с учётом достижений в сферах материаловедения и конструирования / В. Н. Кудрявцев, В. А. Парамонова, О. В. Губяк // Оборудование и технологии пищевых производств: темат. сб. науч. раб.: гл. ред. И.Н. Заплетников. - Донецк: Дон-НУЭТ, 2020. – Вып. 10(43). – С.18-27.
3. Jahazi M. The influence of hot rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of an ultra-high strength steel / M Jahazi, B Egbali // Article in Journal of Materials Processing Technology, published June 2000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/lemcs-15/25838158> – DOI: 10.1016/s0924-0136(00)00474-x
4. Yongli Chen. Application and Progress of Microstructure and Mechanical properties Control Methods for Ultra-High Strength Steel in Rolling Process / Yongli Chen, Xuejiao Zhou, Yuhua Li // Journal of Physics: Conference Series [Электронный ресурс]. - 1637 (2020) 012022 – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1637/1/012022/pdf> – DOI: 10.1088/1742-6596/1637/1/012022.
5. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т. 1. – 9-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – 928 с.
6. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. – М: Машиностроение, 1989 – 640 с.
7. Горбунов, А. Методы измерения твёрдости металлов / А. Горбунов // Журнал Sterbrust.tech - технические новости, статьи, и книги: станки, оборудование, инструмент, технологии [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://sterbrust.tech/tehnologii/izmerenie-tverdosti.html>.

Поступила в редколлегию 25.03.2023 г.

¹А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., ¹В. Б. Котляров, аспирант,

¹С. Б. Котляров, аспирант, ²Б. С. Котляров, канд. техн. наук

¹ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР

² Ялта, Россия

Тел: +7(988) 55-40-021; +7(985) 021-79-06, +7(964) 704-53-62;

E-mail: tm@fimm.donntu.org; svetozar90@mail.ru; velidarkotlarov@mail.ru;
boris.kotlyarov@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГМТ ОСИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕС ПРИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ПЕРЕДАЧ В КПП БЕЗ РАЗРЫВА ПОТОКА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ

В настоящей работе представлены результаты исследования вопросов технологического обеспечения в процессе перевода вращения блок-вала колес КПП без разрыва потока передаваемой мощности (ППМ) на разные оси вращения в процессе переключения передачи. Определены исходные и конечные элементы и установлена функциональная связь между ними в технологической системе, обеспечивающей достижение конструктивных параметров рассматриваемой КПП. Разработан алгоритм расчета и приведены в общем виде формулы для определения параметрических показателей требуемых траекторий, которые обеспечивают перемещения определяющих точек технологической системы при формировании элементов КПП без разрыва ППМ.

Ключевые слова: технологическая система, траектория перемещения, ось вращения, скорость перемещения, фиксация положения, величина смещения.

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

TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR CHANGING THE LMT OF THE AXIS OF ROTATION OF THE WHEELS WHEN GEARS SHIFTING IN THE GEAR BOX WITHOUT BREAKING THE TRANSMITTED POWER FLOW

This paper presents the results of a study of the issues of technological support for the translation of the rotation of the block shaft of the gearbox wheels without breaking the RPM on different axes of rotation in the process of gear shifting. The initial and final elements are determined and a functional relationship between them is established in the technological system that ensures the achievement of the design parameters of the checkpoint under consideration. A calculation algorithm has been developed and formulas for determining the parametric parameters of the required trajectories that ensure the movement of the defining points of the technological system during the formation of the elements of the checkpoint without breaking the PPM are given in general form.

Keywords: technological system, trajectory of movement, axis of rotation, speed of movement, fixation of position, displacement value.

1. Введение

Работа КПП заключается в передаче крутящего момента и мощности с измененной характеристикой параметров на исполнительный вал. При этом наиболее напряженным и критическим является этап работы, заключающийся в процессе изменения скоростей передачи вращения [1, 2, 3]. Особенно ответственным является этот этап переключения скоростей для КПП без разрыва ППМ, в процессе которого необходимо менять ГМТ осей вращения блок-вала колес на заданную величину смещения.

Требуемые параметры обеспечения работоспособности механизмов КПП при переключении передач определяются не только габаритными размерами элементов

коробки, но и кинематическими и динамическими характеристиками взаимодействия зубчатых колес в процессе сопряжения.

Схема переключения элементов КПП в процессе перевода зацепления шестерни с одного колеса на другое с изменением характеристик передач включает ряд элементов [4, 5]. Рассматривать следует конструктивные элементы КПП в их кинематическом и динамическом взаимодействии, которое контролируется в определенных координатных локализациях с фиксацией координирующих элементов деталей в заданных точках пространства КПП. Необходимо определять виды движений для каждого подвижного элемента и детали из состава КПП, направления и характер движения: прямолинейное, вращательное, постоянное, периодическое и т.д. Дальнейшим направлением действий является параметризация движений и силовых взаимодействий деталей, которая касается величин и векторов сил, а также реакций при взаимодействии сопрягаемых деталей и их элементов при штатной работе КПП и в процессе переключения передач. Все эти параметры должны быть увязаны в единой цепочке взаимоотношений, определяющей степень влияния на точность перемещения подвижных элементов в каждый момент времени и взаимного пространственного положения в пространстве МКПП. Также, должны быть просчитаны скорости движений, ускорения и инерционные воздействия и реакции взаимодействующих элементов, а также величины, определяющие быстродействие срабатывания при смене режимов работы и фиксации новых пространственных положений деталей в КПП.

2. Цель и задачи

Цель настоящей работы заключается в создании формализованной взаимосвязи функционально значимых геометрических признаков детали, образующих формы частей, участков и зон деталей с комплексом функционально ориентированных технологических схем воздействия формообразования заданных конструкторской документацией форм и очертаний всех частей обрабатываемой детали. При этом должны быть учтены вопросы геометрической точности образуемых элементов и свойства поверхностей и структуры материала в заданных зонах и участках деталей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд отдельных задач:

1. Установить траектории перемещения определяющих точек и участков деталей в процессе взаимодействия при переключении передач;
2. Провести анализ взаимодействия в кинематических цепях сопрягаемых деталей в МКПП с возможностью дальнейшего воспроизведения при ФОТ-воздействиях формообразующего инструмента в процессе обработки деталей;
3. Установить координатные пределы фиксируемых крайних положений ГМТ осей эксцентриковых планшайб и зубчатых колес КПП в процессе переключения;
4. Установить формальную зависимость скоростей перемещения элементов деталей и геометрических положений определяющих точек деталей в системах тех координат рассматриваемых механических систем, в которых заданы конструктивные признаки.

3. Основное содержание и результаты работы

Взаимодействие ведущей шестерни поз. 4 и ведомого блок-вала колес, поз. 2 на эскизе МКПП (рис. 1), в процессе переключения передач обеспечивает смену оси вращения находящихся в зацеплении и сменяющихся зубчатых венцов блок-вала колес с зубчатым венцом шестерни без разрыва кинематической цепи зацепления.

Выполняется это с помощью эксцентриковых планшайб наружных поз. 13, и поз. 15, а также внутренних эксцентриковых планшайб поз. 14 и поз. 16, указанных на рис. 1. На рис. 1 указаны также позиции основных и вспомогательных деталей КПП без

разрыва ППМ. Подробнее с принципиальным устройством такой КПП можно ознакомиться в других работах авторов [5].

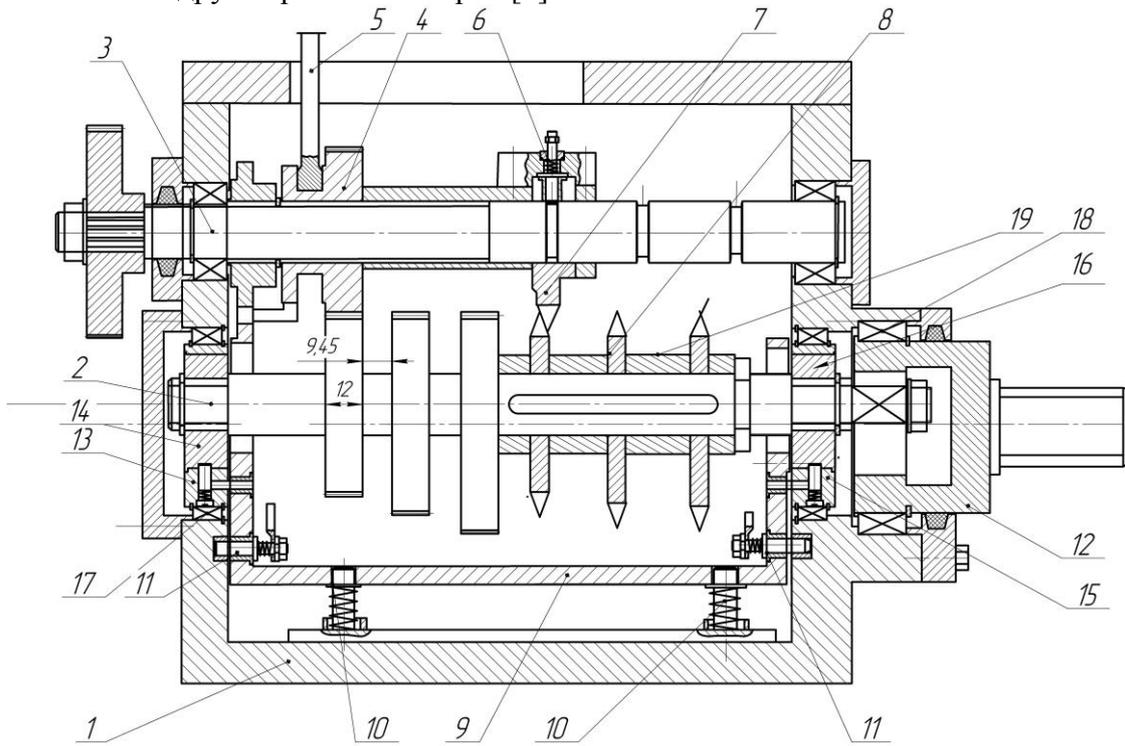


Рисунок 1. Эскиз МКПП без разрыва ППМ

Схема взаимодействия элементов КПП в процессе переключения передач с указанием направлений движений и величин смещения осей вращения шестерни и зубчатых венцов блок-вала колес приведена на рис. 2.

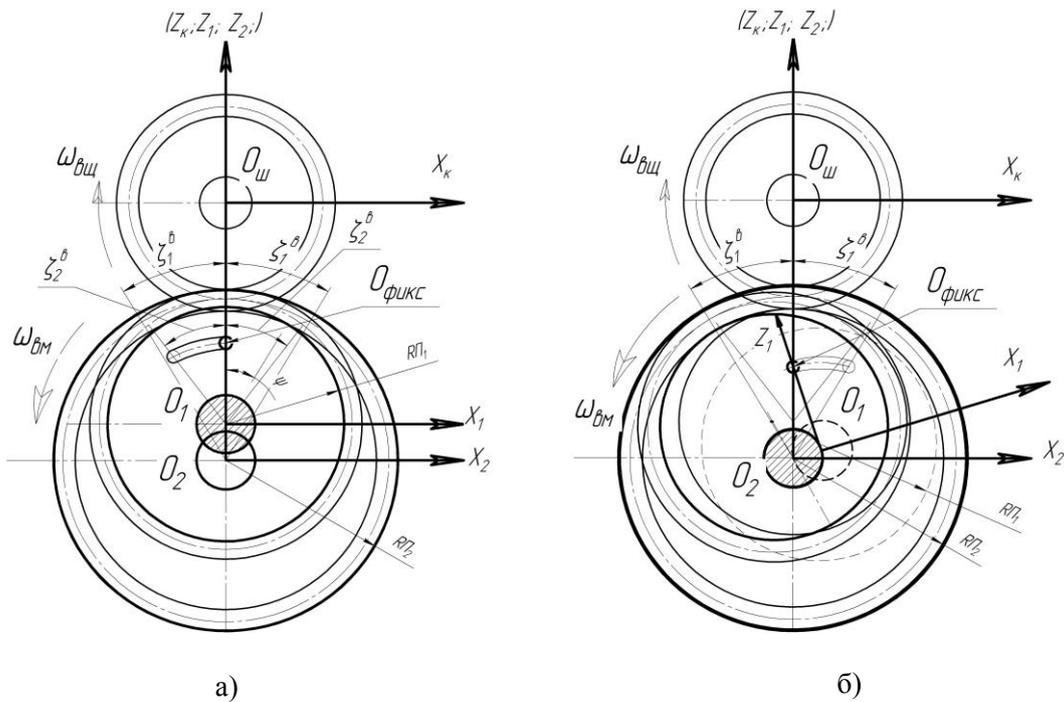


Рисунок 2. Схема взаимного расположения планшайб в начальной фазе переключения.

На рис. 2а показано взаимное положение эксцентриковых планшайб в зацеплении шестерни с первым венцом блок-вала колес, а на рис. 2б – взаимное положение этих же планшайб в позиции зацепления шестерни со вторым венцом блок-вала колес.

Порядок переацепления укрупненно и последовательно представлен на рис. 3, где промежуточные положения планшайб показаны при повороте зубчатых колес на угол β_1 и β_2 .

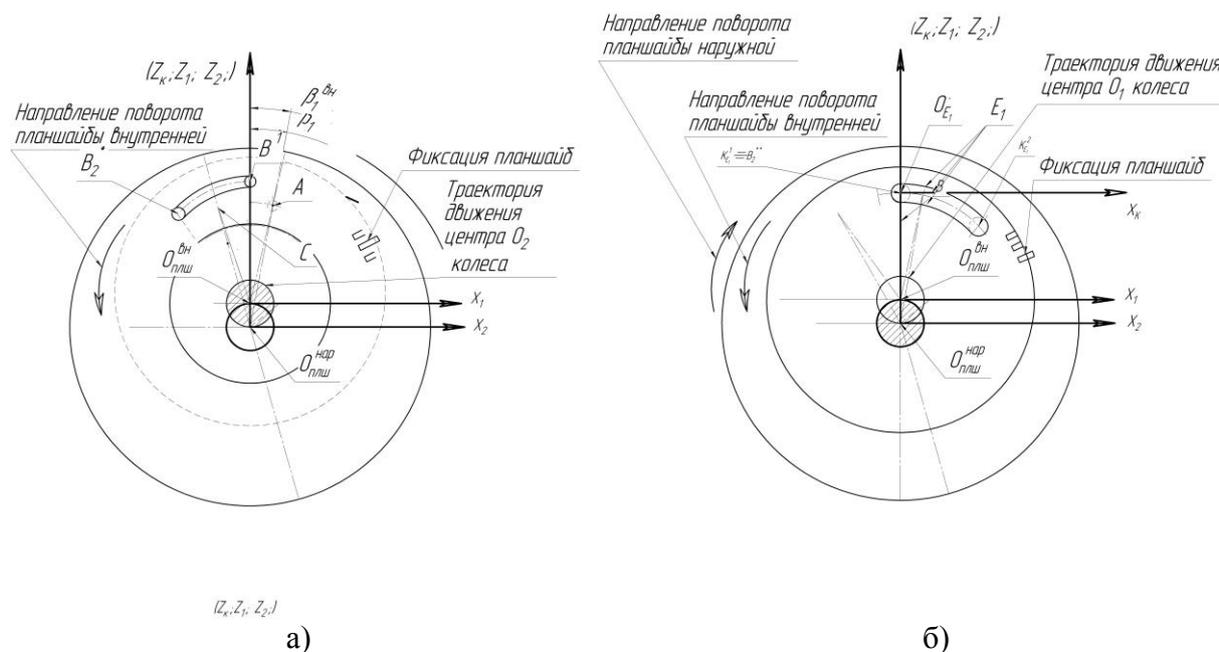


Рисунок 3. Промежуточные положения планшайб и зубчатых колес при переключении.

Принимаем во внимание, что на рис. 3 точка $O_{пли}^{вн}$ совпадает с центром системы координат первого зубчатого венца блок-вала колес, а точка $O_{пли}^{нар}$ совпадает с центром системы координат второго зубчатого венца блок-вала колес. Одновременно эти точки систем координат являются центрами вращения соответствующих колес. Поэтому переключение зацепления шестерни с первого венца на второй венец блок-вала колес соответствует одновременному переводу осей вращения с оси $O_{пли}^{вн}$ на ось $O_{пли}^{нар}$ вдоль оси Z , совпадающей со всеми системами координат сопрягаемых деталей по направлению. Эксцентриситет $\Delta_{Z_1-Z_2}$ осей X_1 и X_2 соответствует размеру B_1B_2 между точками B_1 и B_2 , обозначающими центры фиксирующих элементов внутренней и наружной планшайб в крайних относительных положениях механизма переключения, т. е.

$$\Delta_{Z_1-Z_2} = Z_2 - Z_1 = B_1B_2, \tag{1}$$

где B_1B_2 – линейный размер между точками фиксации планшайб в крайних положениях, а Z_2-Z_1 – линейное перемещение ГМТ центров вращения осей зубчатых венцов входящих в зацепление колес вдоль осей Z .

Для того, чтобы совместить точку B_1 внутренней планшайбы с точкой B_2 наружной планшайбы, совпадающей с ГМТ оси вращения блок-вала колес

относительно оси второго зубчатого венца, необходимо осуществить поворот первой и второй планшайб в относительном движении за период времени, в течение которого происходит переацепление шестерни с зубчатыми венцами блок-вала колес. Эта точка возможна для определения в единственно возможном относительном положении внутренней и наружной планшайб, соответствующем повороту первой планшайбы на угол β_1 , а наружной планшайбы на угол β_2 относительно исходного положения. Это условие является ограничительным и обязательным фактором для исполнения при достижении точного взаимного положения элементов в процессе переключения передач МКПП.

Другим условием точного переключения является необходимость в процессе перевода оси вращения блок-вала колес в новое ГМТ выдержать траекторию перемещения точки B^1 в точку B_2^* при одновременном повороте планшайб, что приводит к переходу в точку B_2^{**} , а также к равномерному и последовательному изменению радиуса точки зацепления шестерни и зубчатого венца колеса относительно мгновенного центра вращения в зацеплении и одновременному переводу мгновенной оси вращения блок-вала колес с точки $O_{пли}^{вн}$ в точку $O_{пли}^{нар}$ по прямой линии (линия $O_{пли}^{вн} - O_{пли}^{нар}$ на рис. 3б).

Расчетная схема такого переходного зацепления представлена на рис. 4.

Основные элементы, влияющие на характер перемещения точки фиксации планшайб при переводе осей вращения зубчатых венцов, указаны на рис. 4а. Расчетная схема содержит основные элементы, обеспечивающие расчет промежуточных и конечных точек траектории перевода планшайб в положения, обеспечивающие зацепление колес.

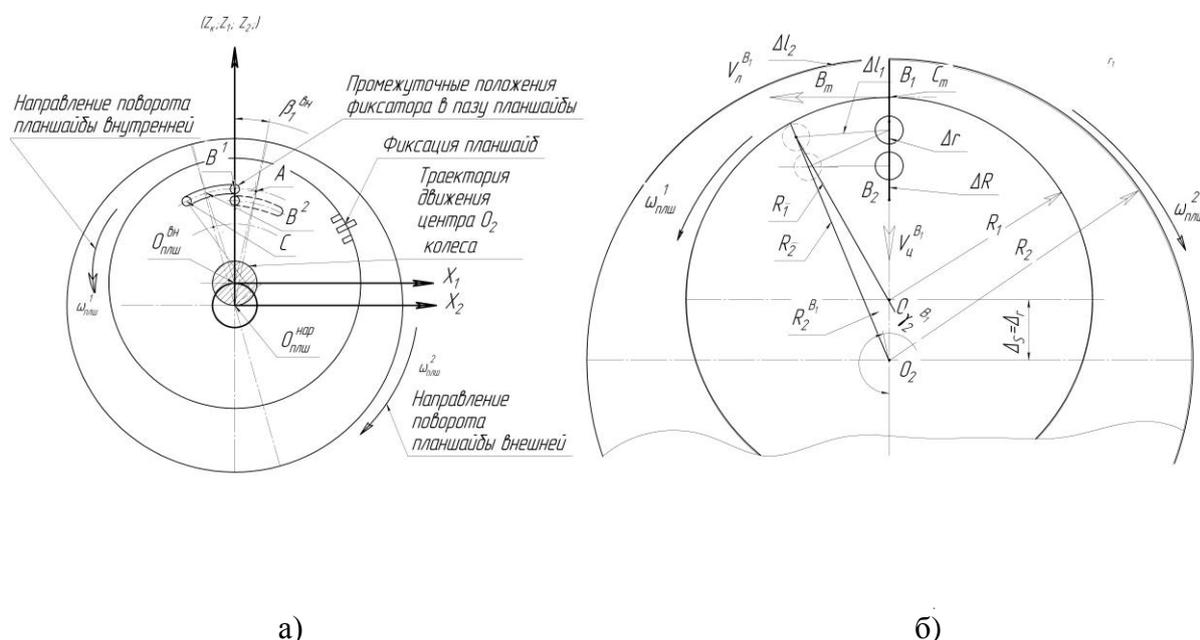


Рисунок 4. Схема, траектория перемещения точки фиксации планшайб при переключении:

- а) конструктивные особенности взаимосвязей планшайб в сопряжении;
- б) расчетная схема перемещения точки фиксации при переключении.

За счет ориентирующего пальца в планшайбе внутренней, имеющего возможность перемещения в пазу планшайбы наружной. В процессе выполнения синхронного проворота внутренней планшайбы в направлении ω_{nl}^1 и наружной планшайбы в направлении ω_{nl}^2 палец перемещается по прямой B_1B_2 . При этом суммарное расстояние перемещения B_1B_2 , которое преодолел палец, равно расстоянию $\Delta s = \Delta r$, соответствующее эксцентриситету размещения зубчатых венцов блок-вала колес относительно общей оси вала и наружной эксцентриковой планшайбы, обеспечивающей центрирование осей вращения зубчатых колес.

Процесс последовательно-непрерывного перевода точки B_1 в точку B_2 центра пальца проиллюстрирован на рис. 5, где на рис. 5а представлена укрупненно общая схема относительного расположения всех планшайб, фиксирующих элементов механизма переключения с указанием конечных и определяющих позиций. На рис. 5б приведена расчетная схема последовательного перевода точки «В» фиксирования в новое положение.

Условно можно представить проворот планшайбы III на некий угол γ_i^1 , при этом осуществляется проворот планшайбы II на угол γ_i^2 за одинаковый промежуток времени. В условном треугольнике ABC за условную единицу времени точка «А» перемещается в точку «В» за счет планшайбы III , а за счет поворота планшайбы II точка «В» переходит в точку «А₂». В этом случае можно записать ряд геометрических зависимостей:

$A_1C_1 = B_1C_1 \text{tg} \gamma_i^1 = l_{12}^p \text{tg} \gamma_i^1$, в то же время $A_2C_1 = B_1C_1 \text{tg} \gamma_i^2 = l_{12}^p \text{tg} \gamma_i^2$, и $A_1A_2 = A_1C_1 - A_2C_1$, т. е.

$$\Delta_i^s = l_{1,2}^p \times \text{tg}(\gamma_i^1 - \gamma_i^2), \tag{2}$$

где l_{12}^p – текущее перемещение точки за единицу времени Δt при $\lim (\Delta t \rightarrow 0)$; углы γ_1 и γ_2 представляют углы поворота первой и второй планшайб, а γ_i^1 и γ_i^2 - это текущие углы поворота соответствующих планшайб за время Δt при $\lim (\Delta t \rightarrow 0)$.

С целью выравнивания угловых скоростей сопрягаемых элементов, пальца и паза, при осуществлении проворота планшайб с соблюдением траектории перемещения в фиксированное положение необходимо выполнить условие:

$$\frac{d\gamma_i^1}{dt} = \frac{d\gamma_i^2}{dt}, \text{ и тогда:}$$

$$B_1B_2 = \int_{\Delta s_1^1}^{\Delta s} \left[l_{1,2}^p \times \text{tg}(\gamma_i^1 - \gamma_i^2) \right], \tag{3}$$

где подинтегральное выражение в (3) отражает мгновенное перемещение по направлению линии B_1B_2 центра фиксирующего пальца за бесконечно малый отрезок времени, стремящийся к «0».

Выражение (3) определяет траекторию кривой направляющей паза планшайбы, благодаря чему обеспечивается прямолинейное перемещение от B_1 к B_2 оси центра фиксирующего пальца. Траектория может быть задана уравнением осевой линии паза планшайбы по крайним точкам. Это уравнение может быть использовано при выполнении паза в системе технологического обеспечения.

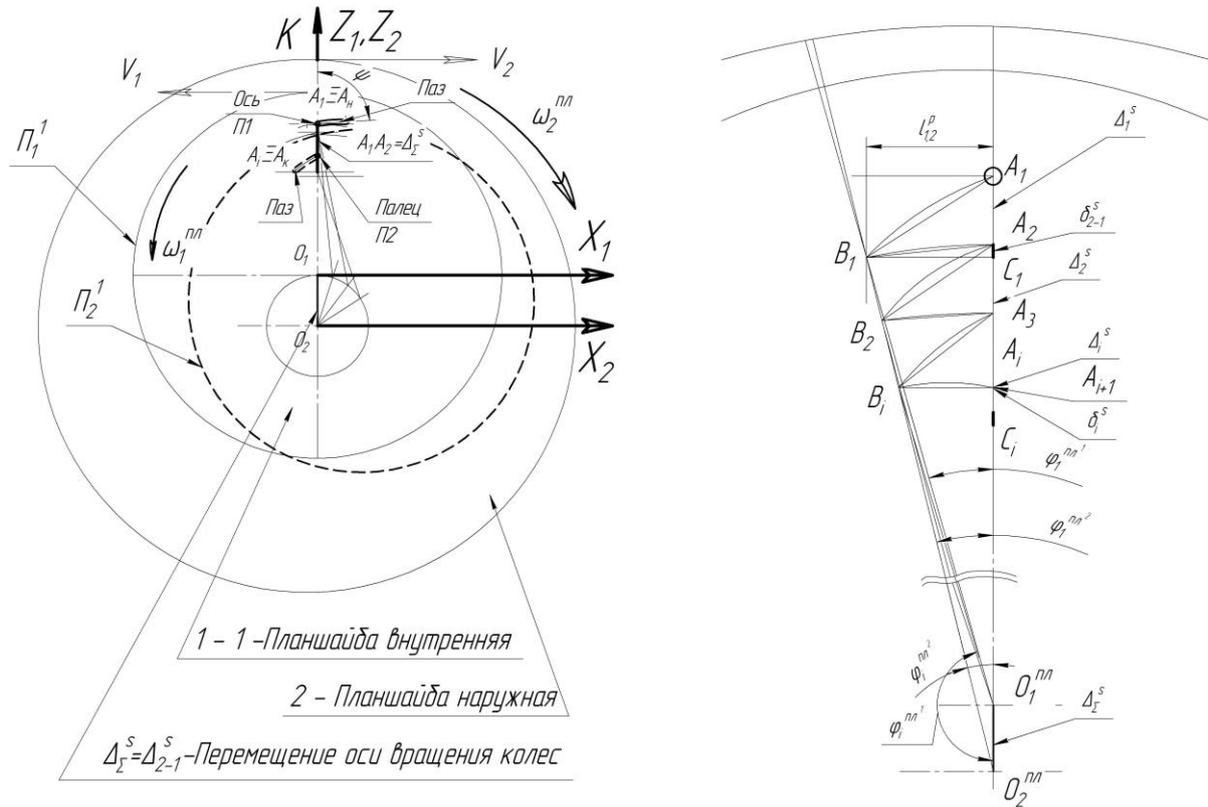


Рисунок 5. Расчетная схема перемещения оси вращения колес при переключении:
 а) схема взаимных положений элементов, участвующих в переключении;
 б) схема постепенного последовательного перевода оси с 1-го во 2-е положение.

Сам паз в планшайбе может быть выполнен согласно уравнению кривой в системе координат XOZ , в виде: $f(M)=f(z,x)$.

На рис. 6 приведена схема, иллюстрирующая определение вида функции $f(z,x)$. Суммарный поворот планшайбы вокруг оси составляет угол ψ . Поскольку поворот на этот угол должен осуществляться за определенный отрезок времени, равный времени поворота планшайбы на угол φ сектора переключения передач блок-вала колес, то можно сделать следующий вывод. Поскольку поворот на угол φ внутренней планшайбы и на угол ψ наружной планшайбы происходит одновременно, то угловые скорости планшайб при стремлении к «0» ($\lim (\Delta t \rightarrow 0)$). Мгновенные угловые скорости $\omega_1 = \frac{d\varphi}{dt}$ и $\omega_2 = \frac{d\psi}{dt}$ планшайб $П1$ и $П2$ в каждый момент времени стремятся к равенству.

Угол β_1 углового сектора переключения для первого венца определяется в виде выражения $\beta_1 = \frac{2\pi R_1 n_{z_1}}{Z_1}$, а угол β_2 углового сектора переключения для второго венца определяется в виде $\beta_2 = \frac{2\pi R_2 n_{z_2}}{Z_2}$, (см. рис. 6). При этом в начальной точке K_n осуществления контакта ведущей шестерни с первым венцом блок-вала колес в начале переключения, и в конечной точке K_k контакта шестерни с первым венцом блок-вала

колес выполняется одновременно контакт с начальной точкой углового сектора второго венца и с конечной точкой углового сектора второго венца. В точках K_H и K_K происходит соответственно полный переход в контакте зубьев шестерни ведущей с одного зубчатого венца на другой венец блок-вала колес.

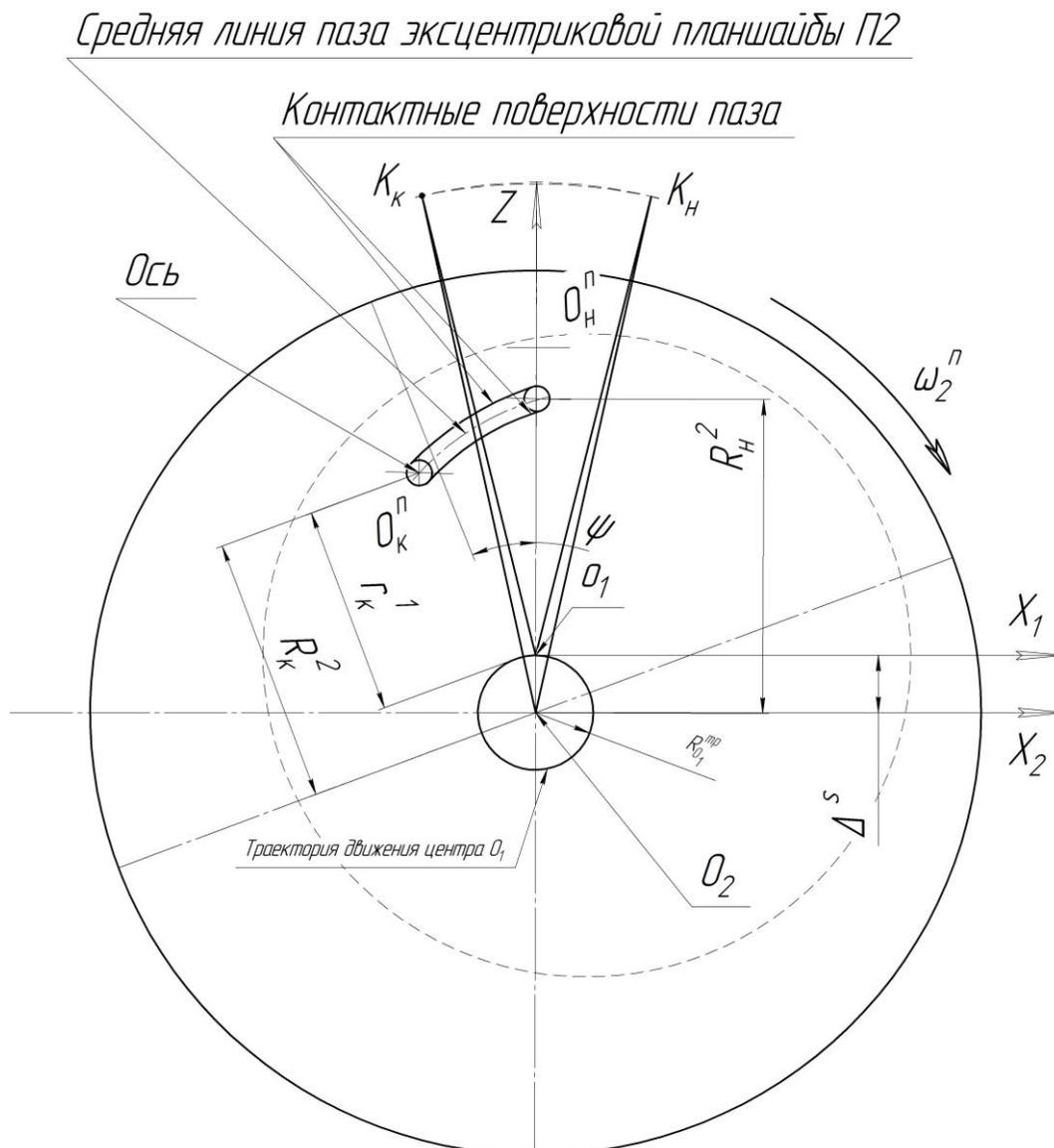


Рисунок 6. Установление положения средней линии ориентирующего паза

Указанные на рис. 6 точки K_H и K_K указывают на ограниченную зону контакта зубьев шестерни при одновременном контакте с зубьями первого и второго венцов блок-вала колес, при этом указывают топологические границы зоны вхождения в контакт и выхода из контакта. За время перехода контакта из точки K_H в точку K_K ось вращения блок-вала колес перемещается из точки O_1 в точку O_2 по прямой линии.

Для обеспечения перемещения по прямой линии необходимо выполнить паз таким образом, чтобы поворот планшайбы П2 на угол ψ выполнялся по расчетной траектории. При расчете траектории линии паза учитывается то обстоятельство, что мгновенный центр вращения в относительном движении и мгновенный центр

скоростей находится в точке контакта делительных окружностей зубчатых колес, а точка оси вращения блок-вала колес является подвижной. Линия перемещения по прямой выдерживается за счет того, что поворот наружной планшайбы П2 обеспечивает угловое смещение, а поворот на такой же угол ψ внутренней планшайбы в противоположном направлении обеспечивает смещение по линии центров шестерни и блок-вала колес.

Исходным моментом для расчета траектории перемещения фиксирующего пальца внутренней планшайбы, следовательно паза наружной планшайбы, является соотношение угловых сегментов секторов переключения шестерни и соответствующего зубчатого венца блок-вала колес. Так угловой сектор шестерни $\alpha_{ш}$ определяется числом зубьев сектора:

$$\alpha_{ш} = \frac{2\pi Z^{ycn}}{Z_{ш}}, \tag{4}$$

где $Z_{ш}$ – полное число зубьев шестерни,

а $Z_{ш}^{ycn}$ – число зубьев углового сектора переключения шестерни.

При этом длина дуги $l_{\partial ш}^{ycn}$ контакта шестерни с дугой контакта от начальной точки до конечной углового сектора зубчатого венца блок-вала колес по делительному диаметру определяется выражением:

$$l_{\partial ш}^{ycn} = \frac{2\pi r_{\partial ш}^{ycn} Z_{ш}^{ycn}}{Z_{ш}}, \tag{5}$$

где $r_{\partial ш}^{ycn}$ – радиус делительного диаметра шестерни. Длина дуги $l_{\partial \kappa_i}^{ycn}$ соответствующего зубчатого венца равна длине дуги сектора шестерни: $l_{\partial ш}^{ycn} = l_{\partial \kappa_i}^{ycn}$.

Время действия углового сектора при переключении $t_{ш}^{ycn} = \frac{\alpha_{ш}}{\omega_{ш}}$, где $\omega_{ш}$ – угловая скорость шестерни. Условие корректной работы устройства – контакт дуг одинаковой длины шестерни и зубчатого венца блок-вала при разных радиусах за один и тот же промежуток времени: $t_{ш}^{ycn} = t_{\kappa_i}^{ycn}$. При этом длина дуги углового сектора венца блок-вала равна:

$$l_{\kappa_i}^{ycn} = \alpha_{\kappa_i}^{ycn} r_{\kappa_i}^{nep}, \tag{6}$$

где радиус $r_{\kappa_i}^{nep}$ является величиной переменной в период переключения и изменяется от $r_{\kappa_i}^{nep} = r_{\kappa_i}^{ном} - r_{\kappa_{i-1}}^{ном}$ до величины $r_{\kappa_i}^{ном}$, где верхний индекс «ном» указывает на номинальный размер радиуса, а нижний индекс « κ_i-1 » – указывает на размер радиуса предыдущего зубчатого венца блок-вала колес. Тогда угловой сектор зубчатого венца колеса определяется выражением:

$$\alpha_{\kappa_i}^{ycn} = \omega_{\kappa_i}^{ycn} t_{\kappa_i}^{ycn}, \tag{7}$$

и одновременно через радиус r_k можно записать: $\alpha_{\kappa_i}^{ycn} = \frac{l_{\partial\kappa_i}^{ycn}}{r_{\kappa_i}^{ном}}$. Связь угла $\alpha_{\kappa_i}^{ycn}$ колеса

и угла поворота планшайбы устанавливается следующим образом.

В зависимости от радиуса r_k^1 размещения фиксирующего пальца на планшайбе П1 определяется угловой сектор ψ_2 поворота наружной планшайбы П2. Факторами синхронизации перевода вращения колес на новую ось являются расстояние Δs между новыми осями (эксцентриситет осей блок-вала колес) и промежуток времени $t_{\kappa_i}^{ycn}$, в течение которого осуществляется перевод, т. е. переключение на новую ступень передачи.

Угол поворота планшайб ψ_1 и ψ_2 не должен быть равен углам поворота $\alpha_{ш}^{ycn}$ шестерни и $\alpha_{\kappa_i}^{ycn}$ колеса блок-вала, но расчет должен обеспечивать переход из точки «А» в точку «В» (рис. 3) на расстояние Δs за время $t_{\kappa_i}^{ycn}$, выражение

$$\frac{\alpha_{ш}^1}{\omega_{\kappa_i}^1} = \frac{\psi_{П1}^1}{\omega_{П1}^1} = \frac{\psi_{П2}^2}{\omega_{П2}^2} = t_{\kappa_i}^{ycn}, \text{ и } \frac{d\alpha_{ш}^1}{\omega_{ш}^{мгн}} = \frac{d\psi_{П1}^1}{\omega_{П1}^{мгн}} = \frac{d\psi_{П2}^2}{\omega_{П2}^{мгн}} = dt_{\kappa_i}^{ycn}, \quad (8)$$

должно быть справедливым для всех указанных элементов. Исходя из указанного можно выбрать радиус точки на планшайбе П2 размещения ориентирующего пальца планшайбы П1 в начальном и конечном положениях траектории перемещения по пазу.

Отдельно следует отметить, что при реализации рассмотренной схемы применения планшайб для перевода осей вращения в требуемые точки, сами планшайбы могут выполнять вращательные движения только для проворота в нужное положение в момент переключения. Можно применять и другие схемы для перевода осей вращения блок-вала колес в точки, соответствующие мгновенному центру вращения. Можно применить, например, механизм по схеме трех эксцентриковых планшайб. В этом случае вращение наружной планшайбы может осуществляться без прерывания при работе механизма.

Конструктивный смысл выражения (8) в том, что при конструктивном исполнении элементов зубчатых колес и эксцентриковых планшайб П1 и П2 таким образом, чтобы механические связи жестко обеспечивали одновременное перемещение оси блок-вала колес на расстояние Δs при одновременном повороте планшайб, автоматически будут обеспечиваться величины мгновенных угловых скоростей взаимодействующих деталей в точках сопряжений в процессе переключения ступеней передач.

Таким образом, из выражений (5, 6, 7, 8) можно установить реальные значения скоростей и конструктивных размеров элементов, в частности планшайб, при изготовлении которых гарантировано, обеспечивается работоспособность механизма.

Заключение

В работе приведены результаты исследований, позволяющие формировать объем ФОР-воздействий при изготовлении эксцентриковых планшайб для МКПП без разрыва ППМ за счет проработки конструктивных элементов, обеспечивающих кинематику при переключении ступеней передач. Для достижения цели работы

получены результаты при решении ряда частных задач, в частности касающихся следующих положений:

1. Установлены траектории перемещения определяющих точек ориентирующих пальцев и пазов эксцентриковых планшайб, обеспечивающих ГМТ осей вращения колес и участков деталей в процессе взаимодействия при переключении передач, с помощью которых обеспечивается кинематика, траектории и режимы резания при формировании геометрии и свойств поверхностей паза;

2. Проведен анализ взаимодействия в кинематических цепях сопрягаемых деталей в МКПП с возможностью дальнейшего воспроизведения при осуществлении ФОТ-воздействий формообразующего инструмента при контакте режущих кромок инструмента и заготовки в процессе обработки деталей;

3. Предложена схема расчета для определения координатных пределов фиксируемых крайних положений пальцев и пазов ГМТ осей эксцентриковых планшайб и зубчатых колес КПП в процессе переключения;

4. Установлена формальная зависимость скоростей перемещения элементов деталей и геометрических положений определяющих точек деталей рассматриваемых механических систем, в которых заданы конструктивные признаки, что является основанием для расчета кинематики в цепи связей при наладке систем станка.

В результате проведенных исследований выявлены зависимости взаимодействий элементов механизма МКПП, в частности ведущей шестерни, ведомых зубчатых венцов блок-вала колес, ориентирующих эксцентриковых планшайб, и разработан порядок ведения вычислений при расчете кинематики в процессе переключения ступеней передач.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Артоболевский, И. И. Механизмы в современной технике. Справочное пособие для инженеров, конструкторов и изобретателей. В 7 томах: Элементы механизмов. Рычажно-кулачковые, механизмы Т. 3. Зубчатые механизмы Т. 4. Изд. 3. – 2019. – 500 с.

2. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов / Б. М. Базров – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.

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

4. Михайлов, А. Н. Проявление атрибутов деталей машин как факторов разработки функционально-ориентированных технологий / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 3 (70). – С. 22-33. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

5. Михайлов, А. Н. Синтез модели функционально-ориентированной технологической системы создания КПП без разрыва потока передаваемой мощности / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – Вып. 4 (71). – С. 35-43. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

Поступила в редколлегию 21.03.2023 г.

УДК 621.923.75

Понамарёва Е. А.¹, ведущий инженер, Попович С. А.¹, ст. науч. сотрудник,
Пешко В. А.¹, ст. науч. сотрудник, Анастасьев А. В.², аспирант,

¹ ГБУ «Научно-технический центр инноваций и технологий», ДНР,

² Донецкий национальный технический университет, ДНР,

Тел./Факс: +7(949)3723781; E-mail: lab@ntcdnr.ru

СИНТЕЗ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОБРАБОТКИ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В статье приведена метода применения метода морфологического анализа с привлечением теории графов для синтеза новых технологических схем отделки поверхностей деталей машин посредством свободного абразива. Произведен разбор технологических схем обработки по базовым характеристикам, необходимый для последующего вывода структурной формулы и описания различных вариантов реализации. Использован алгоритм Дейкстры для аргументированного перебора комплекса вариантов.

Ключевые слова: *отделка, поверхность, свободный абразив, морфологический анализ, синтез.*

E.A. Ponomaryova, S.A. Popovich, V.A. Peshko, A.V. Anastasyev

SYNTHESIS OF NEW TECHNOLOGICAL SCHEMES OF PROCESSING WITH A FREE ABRASIVE USING THE METHOD OF MORPHOLOGICAL ANALYSIS

The article presents a method for applying the method of morphological analysis with the involvement of graph theory for the synthesis of new technological schemes for finishing the surfaces of machine parts using a free abrasive. The analysis of technologies according to the basic characteristics is carried out, which is necessary for the subsequent derivation of the structural formula and description of various options for the implementation of technological processing schemes. Dijkstra's algorithm is used for reasoned enumeration of a set of options.

Keywords: *finishing, surface, free abrasive, morphological analysis, synthesis.*

1. Введение

Незаслуженно игнорируемым направлением отделочной обработки в машиностроении следует назвать обработку поверхностей свободным абразивом. Эти технологии используют для зачистки и финишной доводки деталей в машиностроении. Частным случаем применения выступает также подготовка подложек под нанесение защитных и декоративных покрытий.

Здесь инструментом выступает гибкая среда абразивного порошка – сухая, в пасте или связанная жидкостью. Процесс взаимодействия между средой абразива и поверхностью заготовки подразумевает сложный комплекс скольжения с истиранием, срезом и соударением, причем все указанные явления происходят на микроуровне. В результате в значительной мере снижается шероховатость. В зависимости от схемы реализации и задействованных сил можно говорить о снятии определенного слоя материала, ничтожно малого по сравнению с лезвийной обработкой и намного меньше, чем достигается даже при чистовом шлифовании, и в большинстве случаев отделочные операции с привлечением технологий свободного абразива относят к категории безразмерной обработки.

За счет своих характерных черт – нежесткости импровизированного инструмента, низкого тепловыделения, способности воздействовать на микрорельеф поверхности минимальным силовым фактором – технология обработки свободным абразивом может стать весьма перспективной для доводки сложных поверхностей, в том числе – в отно-

шении деталей из промышленных сплавов, механическая обработка которых традиционными методами затруднена.

2. Морфологический анализ методов обработки свободным абразивом

Синтез новых решений на основе морфологического анализа позволяет в достаточно сжатые сроки получить целый комплекс различных вариантов, в том числе – неочевидных при поверхностном подходе. С его помощью также достаточно удобно исследовать базовые взаимосвязи и зависимости внутри рассматриваемой системы.

Для пошагового исследования и вывода структурной формулы технологической схемы обработки свободным абразивом следует установить несколько базовых характеристик. Назначаем кодировку каждому возможному варианту в таблице 1.

Таблица 1. – Описание базовых характеристик для структурного анализа

№	Базовая характеристика	Варианты реализации	Код
А	Состояние абразивной среды	Сухое свободное	А1
		Связанное жидкостью	А2
		Связанное пастой	А3
		Струйно-воздушное	А4
		Струйно-жидкостное	А5
В	Число источников силового воздействия	Один (традиционная схема)	В1
		Два (гибридная схема)	В2
		Три и более (композиционная схема)	В3
С	Источник силового воздействия	Механический прижим	С1
		Центробежные силы	С2
		Струйная подача под давлением	С3
		Магнитные силы	С4
		Вибрационные силы	С5
		Иные силы	С6
D	Степень подвижности системы	Заготовка неподвижна, абразив подвижен	D1
		Заготовка подвижна, абразив неподвижен	D2
		Заготовка подвижна, абразив подвижен	D3
E	Число задействованных относительных перемещений между заготовкой и абразивом	Одно (одинарная схема)	E1
		Два (парная схема)	E2
		Три и более (сложная схема)	E3
F	Характер относительного перемещения между заготовкой и абразивом	Линейное	F1
		Вращательное	F2
		Планетарное	F3
		Качение	F4
		Хаотичное	F5
		Комбинированное	F6
G	Направленность относительного перемещения между заготовкой и абразивом	Нереверсивное (возможно перемещение лишь в одном направлении)	G1
		Реверсивное (возможна смена направления)	G2

Описывая технологическую схему обработки как набор вариантов базовых характеристик, можно вывести структурную формулу вида:

$$A_p - B_r - C_s - D_t - E_u - F_x - G_y$$

Если число источников силового воздействия насчитывает два и более варианта:

$$A_p - B_r - (C_s - C_s - \dots) - D_t - E_u - F_x - G_y$$

Если при обработке реализовано два и более относительных перемещения между абразивной средой и поверхностью заготовки:

$$A_p - B_r - (C_s - C_s) - D_t - E_u - (F_x - F_x - \dots) - G_y$$

Такой подход позволяет описать практически любую существующую технологическую схему обработки свободным абразивом, отраженную в технической литературе или запатентованную как изобретение. Некоторые схемы проиллюстрированы на рис. 1.

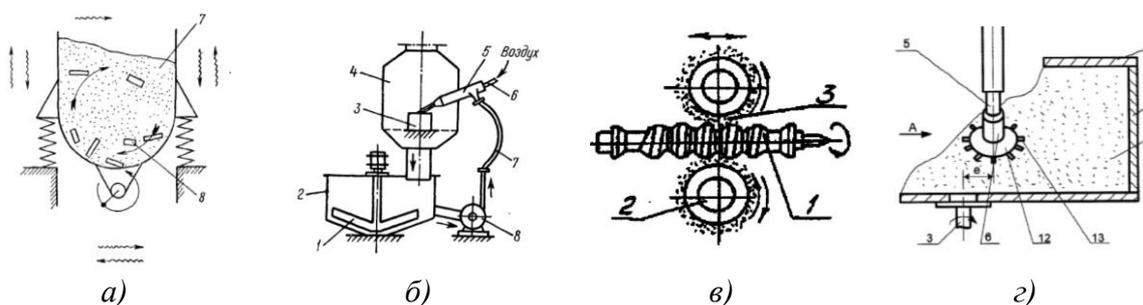


Рисунок 1. Варианты разных технологических схем обработки свободным абразивом

На первой схеме (рис. 1а) приведен вариант классической вибрационной обработки в среде свободного абразива, при которой хаотичное перемещение деталей внутри емкости корректируется дополнительным вращением, которое заставляет массу порошка непрерывно перемещаться [1].

Вторая схема (рис. 1б) демонстрирует классическое применение принципа струйно-абразивной обработки, при котором абразив, связанный потоком воздуха под высоким давлением, подается на поверхность детали. Сама деталь при этом остается неподвижной, а подаваемый абразивный порошок падает в нижнюю емкость [2].

Третья схема (рис. 1в) отражает особенности магнитно-абразивной обработки витков червячного вала. Два облака ферромагнитного абразивного порошка вращаются, симметрично расположенные по обе стороны от заготовки. Самому валу также сообщают вращение, увязанное с движением порошка. При этом источники магнитного воздействия, вокруг которых удерживается абразив, перемещаются параллельно оси заготовки [3].

Четвертая схема (рис. 1з) соответствует центробежно-ротационному методу обработки в среде свободного абразива. Диск с радиально закрепленными на нем деталя-

ми установлен на оправке эксцентрично относительно ротора с абразивным порошком и зафиксирован неподвижно. При вращении формируется центробежно-уплотненный поток абразива, непрерывно омывающий каждую из деталей, причем каждая заготовка последовательно погружается в поток в зависимости от степени наклона оправки и радиального положения на диске [4].

Для аргументированного описания каждой приведенной технологической схемы в кодированном виде путем отражения вариаций базовых характеристик используем таблицу 2.

Таблица 2. Примеры описания технологической схемы обработки структурной формулой

Схема	Расшифровка вариации характеристик	Структурная формула
<i>1a</i>	Состояние среды – сухая несвязанная	<i>A1-B2-(C2-C5)-D3-E1-F5-G2</i>
	Два источника силового воздействия	
	Силовое воздействие – вибрации и центробежная сила	
	Заготовка и абразив подвижны	
	Одно перемещение при контакте	
	Характер контакта – хаотичный	
	Возможно реверсивное движение	
<i>1б</i>	Состояние среды – струйно-воздушная	<i>A4-B1-C3-D1-E1-F1-G1</i>
	Один источник силового воздействия	
	Силовое воздействие – струя под давлением	
	Заготовка неподвижна, абразив подвижен	
	Одно перемещение при контакте	
	Характер перемещения – линейный	
Реверсивное движение невозможно		
<i>1в</i>	Состояние среды – сухая несвязанная	<i>A1-B1-C4-D3-E1-F2-G2</i>
	Один источник силового воздействия	
	Силовое воздействие – магнитные силы	
	Заготовка и абразив подвижны	
	Одно перемещение при контакте	
	Характер контакта - вращательный	
Возможно реверсивное движение		
<i>1г</i>	Состояние среды – сухая несвязанная	<i>A1-B1-C2-D1-E1-F6-G2</i>
	Один источник силового воздействия	
	Силовое воздействие – центробежные силы	
	Заготовка неподвижна, абразив подвижен	
	Одно перемещение при контакте	
	Характер контакта – комбинированный	
	Возможно реверсивное движение	

3. Определение числа всех доступных вариантов

Для иллюстрации предложенного структурного построения также удобно использовать теорию графов, где каждая базовая характеристика становится еще одним уровнем [5]. Отобразим полученный граф на рисунке 2.

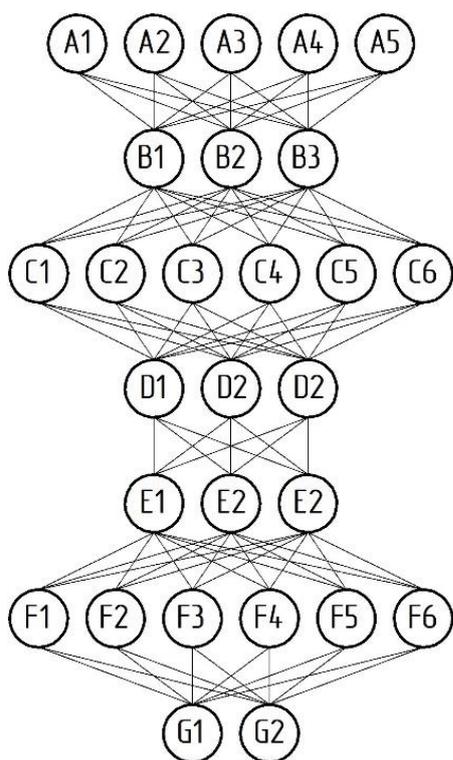


Рисунок 2. Граф структуры технологических схем обработки свободным абразивом

Рассчитаем общее число всех возможных вариантов, образуемое суммой вариаций в пределах указанных базовых характеристик. Для этого используем классический метод расчета числа путей ориентированного графа:

$$G_{\text{общ}} = \prod_{i=1}^n K_i = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$$

где K_i – число значений i -ого параметра;

n – число уровней графа.

Для рассматриваемого графа число путей или число доступных вариантов технологических схем составит:

при $n = 7$

$$G_{\text{общ}} = 5 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 2 = 9\,720 \text{ (вариантов)}$$

Но такой расчет не учитывает, что мы можем одновременно использовать два, три и более силовых источников, а также два, три и более относительных перемещений между заготовкой и абразивом. Вместе с этим число возможных вариантов для этих двух уровней графа закономерно увеличится.

Принимаем, что более трех компонентов в комбинации для уровней С и F мы использовать не будем ради упрощения кинематики процесса.

Для расчета числа возможных вариантов при делении набора из шести составляющих на пары и тройки воспользуемся формулой сочетаний из комбинаторики:

$$V_{6/2} = \frac{6!}{2! \cdot (6-2)!} = \frac{720}{2 \cdot 24} = 15 \text{ (вариантов)}$$

$$V_{6/3} = \frac{6!}{3! \cdot (6-3)!} = \frac{720}{6 \cdot 6} = 20 \text{ (вариантов)}$$

Тогда уровни графа, соответствующие выбранным источникам силового воздействия (С) и характеру относительного перемещения между заготовкой и абразивом (F) расширяются до иного количества вершин, определяемого как сумма исходных вершин, а также сумма парных и тройных вариантов:

$$K_{C,F} = V_{\text{иск}} + V_{6/2} + V_{6/3} = 6 + 15 + 20 = 41 \text{ (вариант)}$$

Покажем расширенный вид графа, в котором схематично показана возможность использования сочетаний двух и трех вершин на уровнях С и F, на рисунке 3.

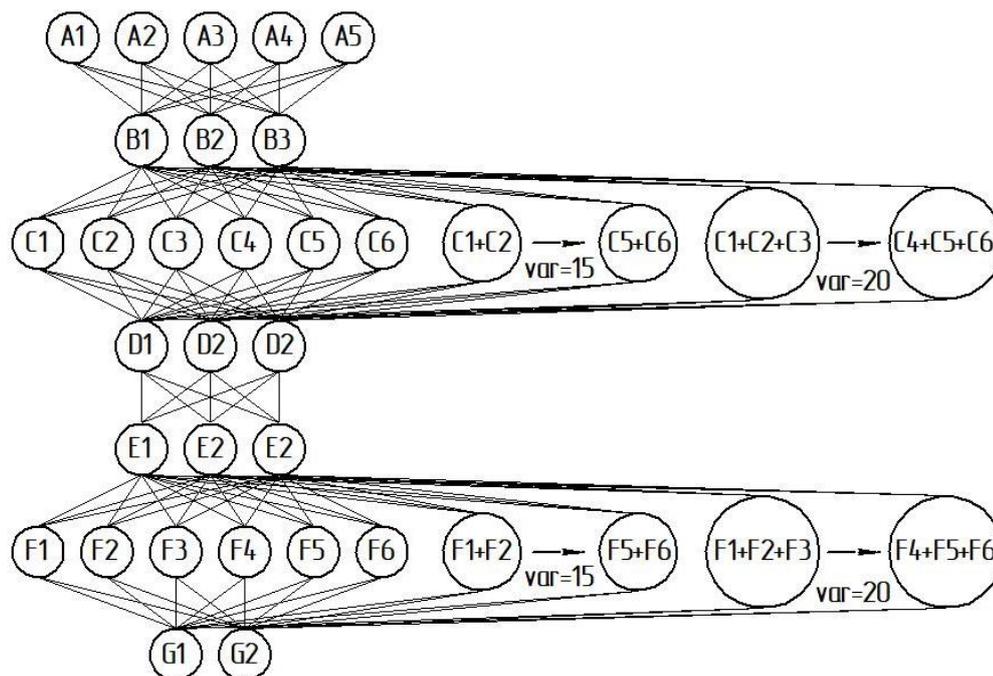


Рисунок 5. Расширенный вид графа с учетом добавочных вариантов на уровнях С и F

Общее число возможных вариантов технологических схем обработки для сформированного графа в этом случае будет равно:

$$G_{\text{общ}} = 5 \cdot 3 \cdot 41 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 41 \cdot 2 = 453\,870$$

Последовательная проработка такого количества вариантов практически невозможна. Даже при привлечении команды опытных специалистов-исследователей это заняло бы месяцы, если не годы аналитической работы. Поэтому разумным будет ввести некоторые обоснованные ограничения, чтобы на стартовом этапе в существенной мере сократить перечень интересующих вариантов структуры.

4. Использование результатов морфологического анализа для синтеза новых технологических схем обработки

В качестве ограничений используем набор критериев, способных охарактеризовать технологическую схему обработки с точки зрения ее эффективности и удобства в реализации. Это будут:

- 1) Критерии, определяющие непосредственное влияние на результат обработки:
 - достижение низкой шероховатости;
 - отсутствие значимого изменения размеров и формы поверхностей;
 - минимальная силовая нагрузка на поверхностные слои;
 - отсутствие термического воздействия на металл.
- 2) Критерии, определяющие адаптацию технологической схемы обработки с учетом состава операции как единицы технологического процесса:
 - возможность повышения производительности;
 - отсутствие сложной наладки;

- возможность гибкой настройки на разные размеры;
- возможность корректировки режимов;
- возможность полной автоматизации процесса;
- безопасность для обслуживающего персонала.

Технологическую схему, полностью удовлетворяющую указанным критериям, следует признать наиболее удобной для обработки свободным абразивом с чисто практической точки зрения. Для ее поиска инструментами структурного анализа используем ограничения, соответствующие следующим утверждениям:

- отказываемся от связывания абразивной среды пастой и применения струйной системы подачи, отдавая предпочтение сухому состоянию (*A1*) и нахождению в жидкостной среде (*A2*);
- выбираем использование исключительно центробежных сил в качестве единственного источника силового воздействия (*B1* и *C2*) как наиболее предсказуемых и простых в реализации средствами механического оборудования;
- учитываем, что при применении центробежных сил перемещение абразивной среды относительно поверхности заготовки не может быть хаотичным и качающимся (исключены варианты *F4* и *F5*);
- чтобы максимально упростить оценку, придерживаемся утверждения, что в схеме реализовано одно-единственное движение взаимодействия абразива и заготовки (*E1*);
- устанавливаем, что реверсивное движение невозможно или не имеет значения (*G1*).

Отразим преобразованный граф на рис. 3.

Тогда общее число вариантов, удовлетворяющих всем указанным выше критериям и ограничениям, составит:

$$G_{\text{крит}} = 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 1 = 24$$

Для дальнейшего перебора вариантов используем алгоритм Дейкстры [6]. Он решает задачу о кратчайших путях из одной вершины для взвешенного ориентированного графа, в котором веса всех рёбер неотрицательны. Дугам, соединяющим соседние графы, присваивается численный вес, а путь из одного начального графа в конечный определяется суммой пройденных дуг.

В нашем случае используем алгоритм Дейкстры, но присваиваем числовую оценку сложности реализации тому или иному варианту базовой характеристики. Поскольку первичное сокращение дерева графа привело к условию, что мы на некоторых уровнях мы используем только один вариант (*B1*, *C2*, *E1* и *G1*), то сумму этих вершин определяем как «0».

При назначении веса исходим из субъективной оценки сложности реализации тех или иных вариантов базовых характеристик.

Принимаем:

1. Отказ от применения жидкости как носителя абразивной среды позволит в значительной мере упростить загрузку оборудования и уменьшит усилие, необходимое для реализации перемещений. Так *A1* = 1, *A2* = 2.

2. Схема, при которой заготовка остается неподвижной, а абразиву сообщают постоянное движение, будет оптимальной с точки зрения условий обработки, пусть даже это потребует усложнения механики реализации. Пусть *D1* = 1.

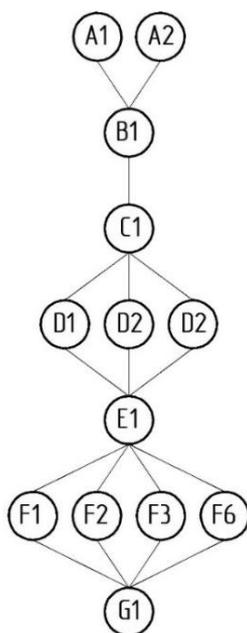


Рисунок 3. Граф структуры технологической схемы с учетом критериев

3. Конструктивно проще обеспечить движение заготовки относительно абразивной среды, но такая мера не позволяет эффективно использовать весь объем порошка и задействовать постоянное перемешивание. Поэтому $D2 = 1$.

4. При привлечении центробежных сил в качестве источника силового воздействия наиболее характерным типом контакта между поверхностью заготовки и потоком абразива будет скольжение по дуговой траектории, что наиболее близко к вращательному движению. Тогда $F2 = 1$.

5. Реализация линейного перемещения путем возбуждения центробежных сил повлечет за собой скольжение по касательной на весьма коротком расстоянии, что менее желательно и потребует вспомогательных перемещений для покрытия всей площади обрабатываемой поверхности. Поэтому $F1 = 2$.

6. Реализация планетарного и вихревого перемещения потребует значительного конструктивного усложнения оборудования. Таким образом $F3 = 3, F6 = 3$.

Сводим расчет веса вариантов в таблицу 3.

Таблица 3. – Расчет веса вариантов.

Формула	Вес			Σ	Формула	Вес			Σ
	A	D	F			A	D	F	
$A1-B1-C2-D1-E1-F1-G1$	1	1	2	4	$A2-B1-C2-D1-E1-F1-G1$	2	1	2	5
$A1-B1-C2-D1-E1-F2-G1$	1	1	1	3	$A2-B1-C2-D1-E1-F2-G1$	2	1	1	4
$A1-B1-C2-D1-E1-F3-G1$	1	1	3	5	$A2-B1-C2-D1-E1-F3-G1$	2	1	3	6
$A1-B1-C2-D1-E1-F6-G1$	1	1	3	5	$A2-B1-C2-D1-E1-F6-G1$	2	1	3	6
$A1-B1-C2-D2-E1-F1-G1$	1	1	2	4	$A2-B1-C2-D2-E1-F1-G1$	2	1	2	5
$A1-B1-C2-D2-E1-F2-G1$	1	1	1	3	$A2-B1-C2-D2-E1-F2-G1$	2	1	1	4
$A1-B1-C2-D2-E1-F3-G1$	1	1	3	5	$A2-B1-C2-D2-E1-F3-G1$	2	1	3	6
$A1-B1-C2-D2-E1-F6-G1$	1	1	3	5	$A2-B1-C2-D2-E1-F6-G1$	2	1	3	6
$A1-B1-C2-D3-E1-F1-G1$	1	1	2	4	$A2-B1-C2-D3-E1-F1-G1$	2	2	2	6
$A1-B1-C2-D3-E1-F2-G1$	1	2	1	4	$A2-B1-C2-D3-E1-F2-G1$	2	2	1	5
$A1-B1-C2-D3-E1-F3-G1$	1	2	3	6	$A2-B1-C2-D3-E1-F3-G1$	2	2	3	7
$A1-B1-C2-D3-E1-F6-G1$	1	2	3	6	$A2-B1-C2-D3-E1-F6-G1$	2	2	3	7

С позиции наименьшего суммарного веса и, соответственно, наибольшей простоты в реализации следует выделить варианты $A1-B1-C2-D1-E1-F2-G1$ и $A1-B1-C2-D2-E1-F2-G1$, расчет веса которых равен 3. Самыми сложными в реализации необходимо признать варианты $A2-B1-C2-D3-E1-F3-G1$ и $A2-B1-C2-D3-E1-F6-G1$, чей вес равен 7 и

для которых потребуется воссоздать планетарное или комбинированное перемещение абразива относительно поверхности заготовки и использовать жидкостную среду для связывания порошка абразива.

На рис. 4 изобразим возможные технологические схемы, соответствующие указанным выше структурным формулам.

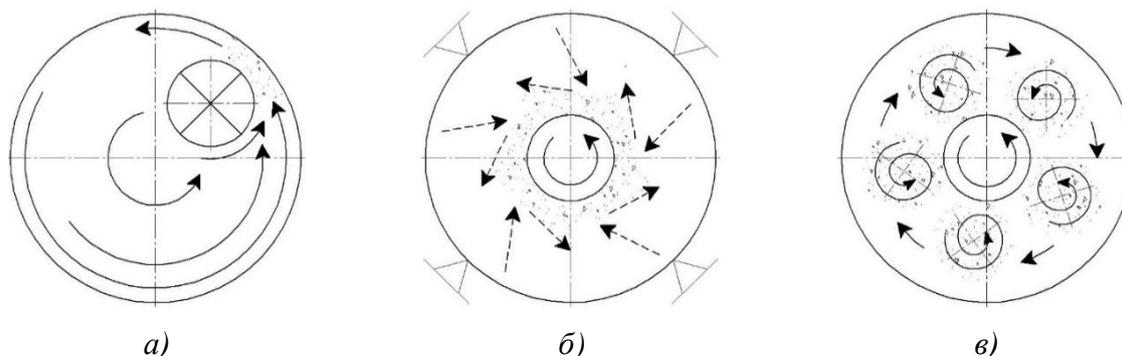


Рисунок 4. Варианты технологических схем обработки:

- а) при неподвижной заготовке, подвижной среде и вращательном перемещении;
- б) при вращающейся заготовке и условно неподвижной среде;
- в) при подвижной заготовке и абразивной среде и планетарном перемещении вихря абразива

Для структурной формулы $A1-B1-C2-D1-E1-F2-G1$, которую по итогам перебора при помощи алгоритма Дейкстры мы признаем наименее сложной в реализации (вес 3), может соответствовать схема обработки, отображенная на рис. 4а. Здесь емкости с абразивным материалом, находящемся в сухом состоянии, сообщают вращательное движение, вызывающее возникновение центробежных сил, наиболее выраженных к наружной части емкости. Поток попадает в зазор между стенкой емкости и поверхностью эксцентрично размещенной неподвижной заготовки, где происходит обработка ее тыловой части по дуге. Кроме того, срединные потоки, встречаясь с неподвижно закрепленной заготовкой, устремляются в тот же зазор, интенсифицируя резание дополнительным уплотнением за счет увеличения массы абразива, попадающего в зазор. Но при этой схеме непосредственный контакт абразива с поверхностью заготовки носит ограниченный характер, близкий к дуге. Это подходит для изделий, где обработке подлежит ограниченная тыловая часть.

Структурную формулу $A1-B1-C2-D2-E1-F2-G1$, обладающую таким же весом (3), можно представить схемой, отраженной на рис. 4б. Ключевым отличием здесь будет то, что возникающие центробежные силы непосредственно связаны с движением заготовки, тогда как абразивная среда сохраняет условную неподвижность и некоторые перемещения потоков связаны исключительно с энергией, приобретенной вследствие контакта абразива с вращающейся заготовкой. При этом определенная масса абразива отталкивается к стенкам емкости, но возвращается к заготовке в том же объеме. Обработка ведется по всей поверхности заготовки, но в этом случае достаточно сложно обеспечить ее эффективность в связи с очень низкими деформационными усилиями, ведь в первую очередь частицы абразива стараются отойти от поверхности заготовки к стенкам емкости, а микрорезание – лишь вторичный процесс.

Исходя из результатов расчета по алгоритму Дейкстры вариант $A2-B1-C2-D3-E1-F3-G1$ следует признать наиболее сложным – ему присуща оценка веса в 7 единиц. Ил-

люстрация схемы реализации обработки с планетарным перемещением абразива приведена на рис. 4в. Заготовка размещена по центру емкости и вращается вокруг своей оси. Вместе с тем создается вихрь абразива, непосредственно контактирующий с поверхностью заготовки и перемещающийся по окружности вдоль всей линии емкости. Постоянное перемещение и перемешивание потоков абразива создает наилучшие условия для обработки всей поверхности заготовки, но конструкция оборудования, способного реализовать подобную технологическую схему, будет весьма сложной.

5. Выводы

Морфологический анализ структуры технологических схем обработки свободным абразивом на основе базовых характеристик может стать удобным инструментом для поиска новых схем отделки различного рода поверхностей.

Метод морфологического анализа для генерации новых структур особенно эффективен в сочетании с теорией графов, наглядно иллюстрирующей структурные взаимосвязи и влияние тех или иных базовых характеристик на технологическую схему в целом, и алгоритмом Дейкстры, который позволяет вести численно аргументируемый просчет оптимальных вариантов, исходя из некоторых ограничений и оценок.

Предложенный в статье метод поиска новых технологических схем обработки свободным абразивом найдет применение в опытном машиностроительном производстве, где присутствует потребность в поиске нестандартных решений в отношении изделий со сложной геометрией поверхностей, нуждающихся в отделочной обработке.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Отделочно-абразивные методы обработки: Справочное пособие. / Л. М. Кожуро, А. А. Панов, Э. Б. Пономарева, П. С. Чистосердов. Под общ. ред. П. С. Чистосердова. – М.: Выш. Школа, 1983. – 287 с. : ил.
2. Ящерицын, П. И. Чистовая обработка деталей в машиностроении: Учеб. пособие. / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов. – Мн.: Высшая школа, 1983. – 191 с. : ил.
3. Хомич, Н. С. Магнито-абразивная обработка изделий: монография. / Н. С. Хомич. – Мн.: БНТУ, 2006. – 218. : ил.
4. Патент №2310553С2 Российская Федерация, МПК В24В 31/104 (2006.01). Устройство для обработки деталей в центробежно-уплотненном потоке свободного абразива / Ильин М. И., Портнов С. В., Ефремов Б. В. – №2005123411/02; заявл. 14.07.2005 : опубл. 20.11.2007. – 6 с.
5. Оре, О. Теория графов. 2-е изд. / О. Оре. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 336 с. : ил.
6. Землянухина, Л. Н. Алгоритмы оптимизации на графах: Учебное пособие. / Л. Н. Землянухина. – Ростов-на-Дону, 2008. – 87 с. : ил.

Поступила в редколлегию 24.03.2023 г.

УДК 621.9.025

Ю. П. Ракунов, к. т. н., доц., **В. В. Абрамов**, д.т.н., проф., **А. Ю. Ракунов**, инженер
НИУ Московский государственный строительный университет, Россия
Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: Rakunov1991@mail.ru

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ ПОДСИСТЕМ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Целью настоящей работы является формулирование задач и описание этапов развития компьютерной интеграции (синтеза) компонентов и подсистем многономенклатурного группового производства, повышающего его плановую организацию и четко регламентирующего его техническое содержание. Используется методология «анализа-синтеза» многоуровневой базовой групповой технологии. Распределение уровней информации по уровням технологии – основа организации и технологии принятия решений на всех стадиях группового производства. Синтез компонентов и систем автоматизированного проектирования (САПР) группового производства на современном предприятии осуществляется с использованием новой информационной технологии, так называемой компьютерной интегрированной производственной системы (КИПС). Эта система является информационной основой (базой знаний с банками данных) для реализации нового технологического уклада, третьей и четвертой версии промышленной революции – «Индустрия 3,0 и 4,0» (Industry 3.0;4.0). В статье приведены основные (базовые) компоненты КИПС, с помощью которой реализуется принцип сквозного конструкторско-технологического проектирования-изготовления изделий на основе групповой технологии. Рассмотрены две основные задачи создания КИПС. Разработан алгоритм проведения работ по технической подготовке группового автоматизированного производства. Рассмотрены этапы решения задач объединения САПР и АСТПП в единую ИСА ТПП, которая позволяет сократить цикл создания сложных изделий от начала постановки на серийное изготовление до первого серийного изделия в 3..4 раза, получить значительный экономический эффект.

Ключевые слова: компьютерная интегрированная производственная система, групповые технологические процессы, метод «анализа-синтеза», многоуровневая базовая групповая технология, автоматизация проектирования, типаж унифицированного режущего инструмента, групповая инструментальная наладка, автоматизированная технологическая подготовка производства. «Индустрия 3,0 и 4,0».

Y. P. Rakunov, V. V. Abramov, A. Y. Rakunov

PURPOSES AND TASKS OF COMPUTER INTEGRATION OF SUBSYSTEMS OF MULTIPLE GROUP PRODUCTION

The purpose of this work is to formulate tasks and describe the stages of development of computer integration (synthesis) of components and subsystems of multi-product group production, which increases its planned organization and clearly regulates its technical content. Here, the methodology of "analysis-synthesis" of a multi-level basic technology is used - as two main basic methods of scientific knowledge. The distribution of information levels by technology levels is the basis of organization and decision-making technology at all stages of group production. Reliable and timely information is the basis for managing the main flows in production: material and energy. Synthesis of components and computer-aided design (CAD) systems in a modern enterprise can be carried out using the latest information technology, the so-called computer integrated production system (CIPS). This system is an information basis (knowledge base with data banks) for the implementation of the new technological structure and the fourth version of the industrial revolution – Industry 3.0 & 4.0. In the article, the basic components of CIPS (or CIM) are presented, with the help of which it is possible to realize the principle of through design and technological design-manufacturing of products based on group technology. Two main tasks of creating CIPS are considered. The stages of solving the problems of combining CAD and ASTPT (subsystems) into a single SISA TPT are considered, which allows to shorten the cycle of creating complex products from the beginning of the production for serial production to the readiness of the first serial product in 3 ... 4 times, get a significant economic effect.

© Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.; 2023

Keywords: *computer integrated production system, group technological processes, "analysis-synthesis" method, multi-level basic group technology, design automation, type of cutters of unified structures, group instrumental adjustment, automated technological preparation of production, "Industry 3.0 &4.0".*

1. Введение

Решение задачи импортозамещения и перевода экономики с экстенсивного на интенсивный путь развития вызывает необходимость существенного совершенствования организации и управления производственными системами на всех уровнях [1].

Совершенствование организации и управления должно удовлетворять требованиям, направленным, во-первых, на повышение эффективности производства, во-вторых, на учёт всё возрастающей сложности его организации и технической подготовки и, в-третьих, на использование новых форм и методов решения взаимосвязанного комплекса задач развития техники, групповой технологии, организации и экономики производства [2,3].

Практика отечественного и зарубежного машиностроения показывает, что при создании перспективных изделий с технико-экономическими показателями, на уровне лучших мировых образцов, должна быть поставлена задача не только автоматизации и механизации всех видов групповых технологических процессов (ГТП) и применения передовых конструктивно-технологических решений, но и принципиально новой организации производства, т. е. существенное изменение его структуры в целях сокращения и удешевления процесса создания изделий. Без этого даже самые новые технологические решения, заложенные при проектировании изделий, могут оказаться устаревшими к моменту выпуска серийного образца, а сами изделия – неконкурентоспособными на мировом рынке [4, 12-16].

Совершенствование производственной структуры опытных и серийных предприятий особенно важно в условиях, когда на них производятся изделия различных типоразмеров (ТР) и моделей, т.е. в мелкосерийном многономенклатурном производстве

Применение современных методов организации и автоматизации мелкосерийного многономенклатурного группового производства позволяет использовать для выпуска новых конкурентоспособных изделий путь конструкторско-технологической гибкости, при котором обеспечивается высокая оперативность внесения изменений, возможность применения самых новых технических достижений, даже если они возникли в процессе производства изделия, способность быстро перестраиваться в соответствии с изменением условий планирования, финансирования, требований заказчика, конъюнктуры рынка и пр. [4,5].

2. Основное содержание и результаты работы

Один из путей достижения максимальной эффективности группового промышленного производства – объединение различных компонентов и систем производственного предприятия на основе новой информационной технологии, - компьютеризированной интеграций производственной системы (КИПС). КИПС представляет собой комбинацию программных, аппаратных и технических средств, предназначенных для проектирования изделий, планирования производства, управления производственными процессами, проектирования оборудования, оснастки и инструмента, а также для осуществления производственного процесса и обеспечения качества продукции [1]. На всех уровнях систем КИПС используются компьютеры: базы данных, системы управления базами данных, системы и алгоритмы автоматизированного проектирования, методы моделирования, программное управление оборудованием (рис. 1).

Т. о., представляется актуальным создание КИПС, с помощью которой возможно реализовать принцип сквозного конструкторско-технологического проектирования –

изготовления изделий с охватом как опытного, так и серийного производства на основе групповой технологии, обеспечивающей высокую гибкость процесса [6-11].

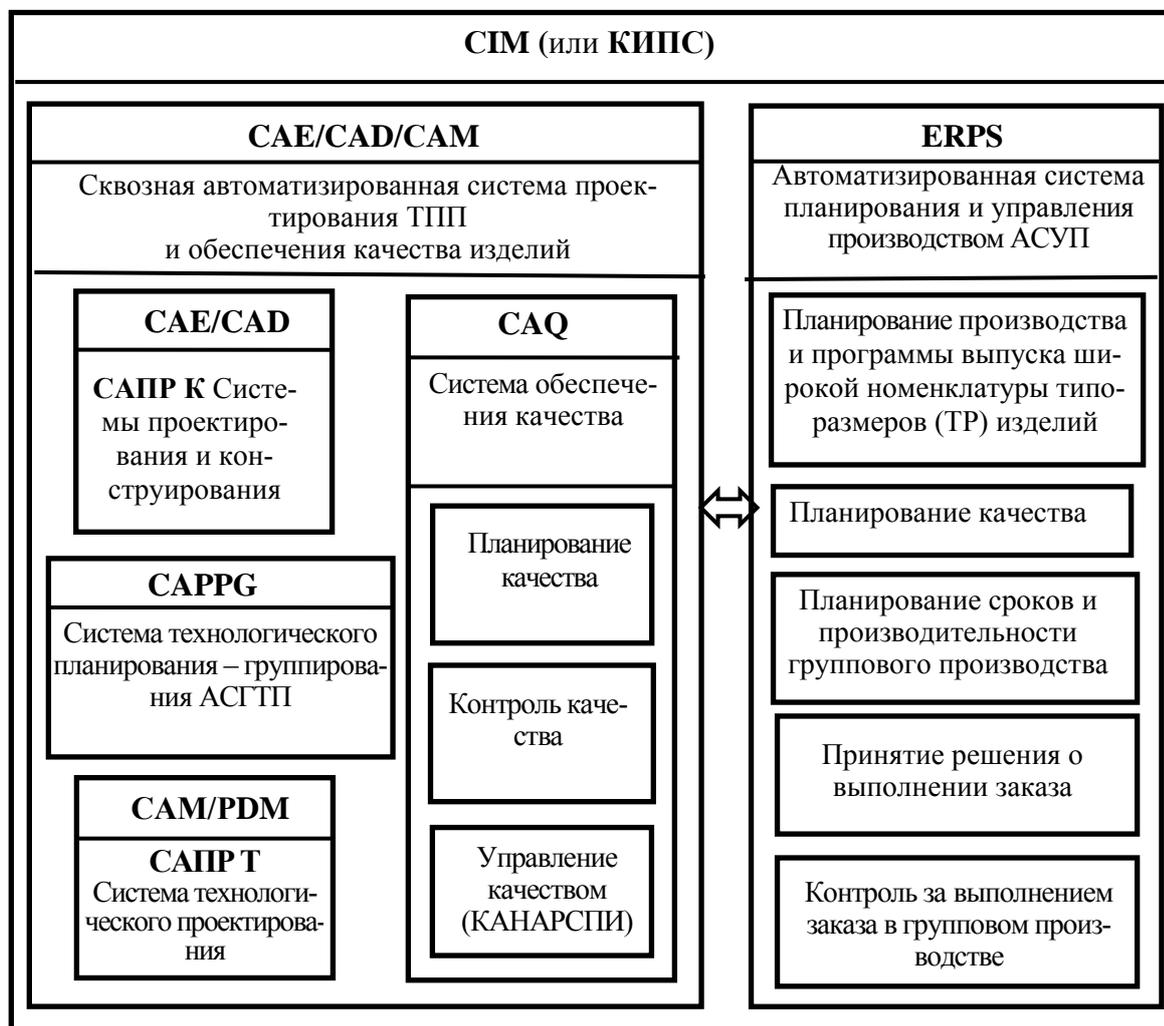


Рисунок 1. Основные компоненты компьютеризованной системы (СИМ или КИПС)

Разработка КИПС представляет собой сложную многоаспектную и многоступенчатую задачу. Однако на большинстве предприятий ряда передовых отраслей машиностроения есть достаточно серьёзные предпосылки для её успешного решения: программно-управляемое технологическое оборудование (станки с ЧПУ), программно-перестраиваемые средства автоматизации вспомогательных операций (промышленные роботы, автоматизированные склады, транспорт), современные технические средства автоматизации управления (ЭВМ и микропроцессоры), автоматизированные системы проектирования и конструирования (САПР), управления производством (АСУП) и технологической подготовки производства (АСТПП), управления групповыми технологическими процессами (АСУГТП) или их компонентами [1,2].

Для таких предприятий создание КИПС станет организующим фактором, который позволит подчинить данное оборудование, технические средства и системы единой задаче – ускорению группового производства, увеличить эффективность их использования [2-4]. На рис. 2 показан порядок проведения работ по технической подготовке

производства на основе методов групповой обработки в условиях функционирования КИПС. При создании нового изделия на авиационном объединении указанные выше предпосылки, имеющийся опыт и проведённые поисковые разработки дали возможность сформулировать основную идею и определить этапы создания КИПС изделий совместными усилиями ОКБ, опытного предприятия, серийного завода и отраслевого НИИ. В отличие от разработки ГТП на основе «комплексной» детали, предлагается методика группирования деталей, проходящих через «сетку» групповых инструментальных наладок (ГИН), составленных из унифицированных режущих инструментов (УРИ), спроектированных специально для реализации ГТП (см. рис 3) Такая прогрессивная методика и типаж УРИ с примерами синтеза ГИН представлена в ряде работ [5 -11].

Основная идея КИПС заключается в том, чтобы, создав силами ОКБ и опытного предприятия систему сквозного проектирования – изготовления опытных изделий, транслировать ее через единую вычислительную сеть на серийный завод (заводы), где должно быть организовано параллельное изготовление серийных изделий по управляющим программам на оборудовании с ЧПУ, отработанном в опытном производстве. Главным условием для реализации этой цели является аппаратная и программная совместимость базовых программных и технических средств систем (САПР, АСУП, АСТПП, АСУТП и др.) как в опытном, так и в серийном производстве и идентичность основного технологического оборудования с ЧПУ, используемого для опытного и серийного группового изготовления изделий. Система является информационной базой знаний с банками данных для реализации нового технологического уклада 3-ей и 4-ой промышленной революции «Индустрия 3,0 и 4,0» (Industry 4.0) [11-18]. В последнее время эволюции искусственного интеллекта посвящено множество работ [12-18]. **В процессе создания КИПС решаются две основные задачи.** Первая – интеграция процессов управления, конструирования, технологической подготовки производства, автоматизированного изготовления, контроля и испытания изделий в единую интегрированную систему сквозного проектирования и изготовления изделий в опытном производстве.

Вторая – создание аналогичной системы на принципах групповой технологии на серийном заводе. Подобная производственная система была создана и функционировала при изготовлении формообразующих конструктивных элементов теплозащиты многоразового космического корабля «Буран».[1]. Первым этапом решения задач является объединение САПР и АСТПП в единую интегрированную систему автоматизированной технической подготовки производства (ИСА ТПП) на базе общих банков конструкторско-технологических данных. Достижимая цель – совмещение решений конструкторских и технологических задач на самой ранней стадии проектирования, достижение высокой технологичности, оптимальность принимаемых конструкторско-технологических решений; одновременное получение конструкторских и технологических выходных данных (КТД) в памяти ЭВМ. Результат – сокращение цикла проектирования в 2 раза. Второй этап – объединение ИСА ТПП и АСУТП (ГПС обработки) опытного производства в единую интегрированную производственную систему сквозного проектирования и изготовления деталей опытных изделий на базе общей локальной информационно-вычислительной сети (ЛИВС). Достижимая цель – совмещение в пространстве и времени этапов выхода КТД с началом обработки деталей в производственном цехе путём прямого машинного управления технологическим оборудованием с ЧПУ от ЭВМ, упразднение чертежа как носителя исходных данных для подготовки управляющих программ (УП), достижение абсолютной гибкости при внесении конструкторских изменений.

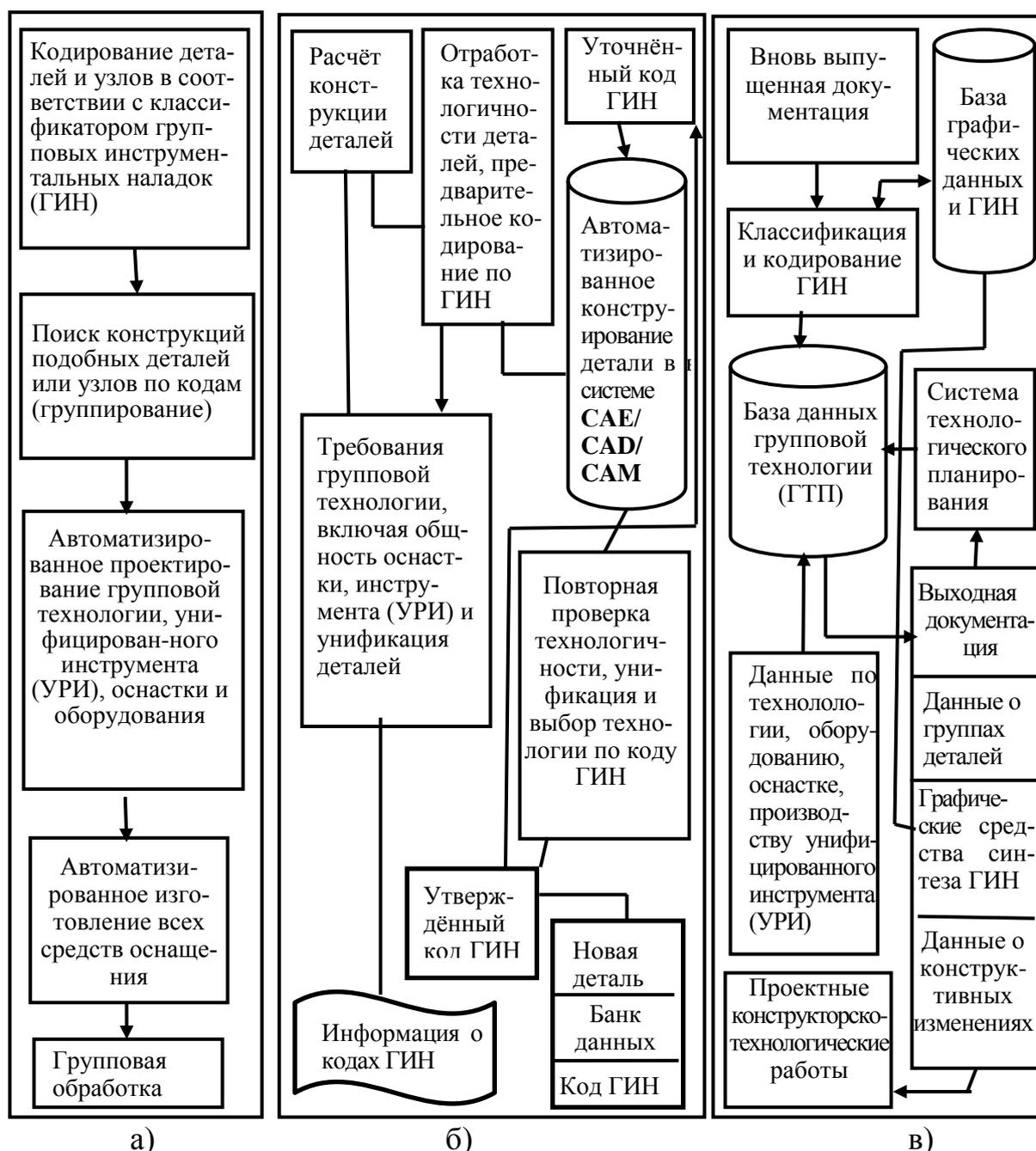


Рисунок 2. Порядок проведения работ по технической подготовке производства в групповом автоматизированном производстве: а – порядок выполнения работ при групповой обработке в системе CAE/CAD/CAM; б – порядок присвоения кода и группирование деталей в процессе проектирования; в – формирование базы данных ГТП и синтеза групповых инструментальных наладок (ГИН)

Третий этап – присоединение к КИПС производственных систем сборки агрегатов и узлов, испытаний готовых узлов и превращение её в единую интегрированную систему сквозного проектирования и изготовления агрегатов и узлов опытных изделий. Достигаемая цель – организация программно-управляемой поточной сборки агрегатов на базе поточно-групповых методов автоматизированного изготовления деталей, иду-

щих на сборку агрегатов; постановка агрегатов на сборку по графику. Результат – сокращение цикла сборки, уменьшение времени ожидания (пролёживания на складе) деталей, сокращение межоперационных заделов.

Четвёртый этап – присоединение к КИПС производственных систем окончательной сборки и испытаний готовых изделий и превращение её в единую интегрированную систему сквозного проектирования и изготовления опытных изделий. Достижимая цель – организация программно-управляемой поточной сборки изделий на базе поставляемых по графику узлов и агрегатов. Результатом второго - четвёртого этапов является сокращение цикла изготовления опытного изделия в 2...2,5 раза.

Вторая задача создания КИПС включает: передачу на серийное предприятие общего и специального программного обеспечения (СПО), необходимого и достаточного для генерации единой компьютеризированной интегрированной производственной системы (ЕКИПС) автоматизированного изготовления изделий в серийном производстве; передачу пакетов УП, по которым в опытном производстве осуществлялась обработка деталей и узловая, агрегатная и окончательная сборка. Достижимая цель – автоматизированное изготовление изделий, начиная с первой машины по УП, обработанным в опытном производстве; возможность внесения изменений на машинном уровне; возможность быстрого перехода на изготовление нового изделия путём замены только специального ПО. Результат – сокращение цикла запуска и изготовления серийного изделия в 3 раза.

Для успешной реализации технологии групповой обработки ответственных деталей летательных и космических аппаратов (ЛиКА) на станках с ЧПУ в НИАТе совместно с Московским филиалом НИТИ были разработаны методики проектирования типажей унифицированного режущего инструмента (УРИ), режимов оптимального резания (РОР), синтеза групповых инструментальных наладок (ГИН), оптимизации их применения и внедрения на приборных и агрегатных заводах авиационно-космической отрасли (рис. 3).

Любая групповая или индивидуальная ИН синтезируется из ТР РИ.

Режущий инструмент в конструктивном исполнении является элементом оснащения с наименьшей «гибкостью» использования его технологических возможностей [6-9]. **Основные компоненты гибкости РИ следующие:**

- возможность реализации групповой обработки заготовок;
- быстрая наладка, переналадка и регулировка на размер;
- возможность автоматической замены изношенных РИ;
- точность базирования РИ-дублёров по координатам: осевой – x , вертикальной – z без выполнения пробных проходов;
- использование режимов оптимального резания (РОР), обеспечивающих максимальную удельную размерную стойкость [$\text{дм}^2/\text{мкм}$] на финишных проходах и заданную производительность [$\text{см}^3/\text{мин}$] на предварительной обработке;
- предотвращение работы с предельным износом (прогноз) во избежание поломки РИ.

Для решения поставленных задач были разработаны и реализованы основные принципы конструирования унифицированных универсальных, специализированных и специальных резов для осуществления токарной групповой обработки.

Суть принципов конструирования УРИ в следующем:

- механическое крепление режущих элементов (РЭ) в державке;
- наибольший охват номенклатуры обрабатываемых поверхностей деталей;

- уменьшение номенклатуры резцов за счёт унификации и стандартизации РЭ переходных втулок и державок;
- расположение узла крепления РЭ в державке вне рабочей зоны и надёжность их закрепления для наибольшей жёсткости РИ;
- обеспечение быстродействия закрепления при замене изношенного РЭ;
- технологичность конструкции РЭ для их централизованной заточки, доводки в многоместных приспособлениях и многократности их переточки;
- создание рациональных схем многократной переточки РЭ для повышения общего ресурса РИ и коэффициента использования инструментальных материалов.



Рисунок 3. Структура ГТП и основные организационно-технологические мероприятия (приёмы) при разработке высокотехнологичных групповых процессов.

На основе анализа производственной статистики диаметров, длин и сочетаний обрабатываемых поверхностей деталей и ограничения соотношений размеров внутренних поверхностей (соотношения l_p/d_p , T/d_p), расчётов и, руководствуясь сформулированными принципами, был создан типаж унифицированных универсальных и специализированных резцов, предназначенных для синтеза, как групповых, так и индивидуальных ИН. Цилиндрическая форма многократно перетачиваемых РЭ наиболее техно-

логична, т. к. позволяет использовать высокопроизводительные методы обработки. Открытые плоские или винтовые передние поверхности РЭ обеспечивают возможность их переточки и доводки после допустимого износа только по задним граням. Это позволяет механизировать процесс при использовании многоместных кассетных приспособлений. При этом максимально используется тело РЭ, т.е. уменьшается расход твёрдого сплава и трудоёмкость обработки при увеличении количества переточек и снижении стоимости периода стойкости РИ. **Типаж обеспечивает:**

- возможность групповой обработки «токарных» деталей в условиях многономенклатурного мелкосерийного, опытного и даже единичного производства;
- растачивание отверстий (сквозных и глухих) и/или обтачивание открытых и закрытых наружных поверхностей;
- комплектование групповых инструментальных наладок (ГИН) максимальной жёсткости при обработке диапазона диаметров внутренних поверхностей с указанным отношением l_p/d_p , T/d_p ;
- технологичность изготовления и переточки РЭ;
- полную взаимозаменяемость быстросменных РЭ.

Пример конструктивного исполнения резца унифицированного универсального расточного контурного для обработки диапазона диаметров (от 6 до 10 мм) показан на рис. 4.

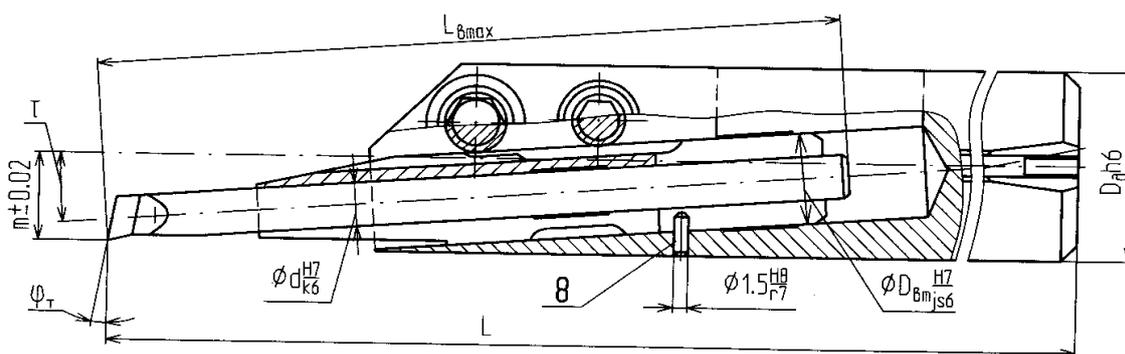


Рисунок 4. Резец унифицированный универсальный расточной контурный для обработки диапазона диаметров и подрезки торцевой поверхности глухого отверстия.

Использование разработанного типажа УУР с указанием их технологических возможностей позволяет технологам синтезировать оптимальные групповые и индивидуальные ИН, разрабатывать технически обоснованные управляющие программы (УП) системы ЧПУ (программные наладки); прогнозировать количество обработанных деталей этими наладками до смены каждого РИ. Появляется возможность оптимизации методом «прямого счёта» периодов стойкости отдельных РИ в групповых или индивидуальных ИН. Это даёт возможность смены РИ одновременно или с кратным интервалом от машинного времени обработки расчётной партии запусков заготовок [6-10]. Оптимизация синтеза ГИН для токарных станков с ЧПУ позволяет минимизировать количество ТР инструментов в групповом производстве, добиваясь увеличения общего количества высокоточных деталей, обрабатываемых до смены инструментов при достижении максимально допустимого износа каждого из них [6-9]. Работа по синтезу (интегрированию) **модели установка** начинается с первичной подсистемы МБГТ, разработанной в таблично-матричной форме и определяющей комплекс условий технологической наследственности и коэффициента уточнения на каждом проходе для обеспечения параметров формируемых свойств обрабатываемых поверхностей [7-11]. Это позволяет

сопоставлять технологические модели групп деталей с моделями технологических методов, формирующих свойства на всех этапах производства и подбирать оптимальный метод и минимизировать количество типоразмеров РИ, станкоёмкость и технологическую себестоимость.

УСТАНОВ – состав позиций, переходов и проходов, выполняемых деталие-операционным комплектом позиционных инструментальных наладок (КПИН) при одноразовом базировании и закреплении заготовки(ок) в приспособлении на оборудовании. *Модель установка* указывает точный адрес рабочего места с его атрибутами, то есть наладками: - установочной; - инструментальной и программной (см. рис. 3). *Модель установка* определяет технико-экономические показатели: инструментоёмкость, трудоёмкость, станкоёмкость и технологическую себестоимость по сравнению с альтернативными вариантами установов или ТП, так как позволяет применять к определению перечисленных показателей метод «прямого счета» [6-11].

Известен ряд концептуальных подходов к решению проблемы синтеза структур ГТП. Однако каждый из них обладает рядом недостатков, в том числе и принципиальных, которые делают невозможным создание эффективно работающих САПР ГТП на их основе [1-5,9-18]. Метод синтеза хотя бы один раз требует формирования внешних связей между элементами для создания из них элементов более высокого уровня. Этот метод предполагает определение состава элементов, построение новых связей, проверку их достоверности и параметрическую настройку с использованием логических правил и аналитических зависимостей. Проектирование можно вести, как с использованием аналогов, так и без них. При использовании аналогов необходимо включать в аналог новые элементы или существенно изменять их последовательность [1-4,9,18].

3. Выводы

Подсистема синтеза конкретизирует содержание и дополняет номенклатуру деталие-операций последовательным синтезированием номенклатуры и последовательности (состава) входящих технологических событий уровней: установов, позиций и переходов из первичных элементов технологических процессов, с учетом конкретных моделей оборудования, возможностей групповых и индивидуальных (специальных), позиционных и деталие-операционных (установочных) групповых инструментальных наладок, а также управляющих программных наладок [7-11]. Метод синтеза может быть эффективно использован как при индивидуальной оптимизации обработки крупносерийных деталей, так и при групповой обработке деталей на современном мелкосерийном многономенклатурном производстве. Рассмотренный в работе [8] алгоритм и блок-схемы являются логической и методической основой подсистемы оптимизации принятия технологических решений в системе МБГТ. Применение метода синтеза для решения задачи перебора технически возможных вариантов интегрируемых переходов, позиций и установов на профессиональных персональных компьютерах при правильном заполнении таблиц-матриц технологом средней квалификации даёт возможность получения оптимального для существующего производства ГТП механической обработки высокоточных токарных деталей простой и сложной формы. Единая система технологических признаков, учитывающих номенклатуру, диапазон и точность свойств деталей позволяет обеспечить сопоставление, подбор и необходимую эффективность технологии при использовании компьютерной техники [6-12]. Практическое использование системы МБГТ даёт возможность создания базы знаний и баз данных системы автоматизированного сквозного проектирования изделий точного машиностроения, т.е. интегрированных САПР: САЕ/САР/САМ/САРР. Это особенно важно для разработки пол-

ноценной системы САМ/САРР (автоматизированная технологическая подготовка группового производства и проектирование детали-операций ТП) [6-12]. Преимуществами предлагаемого подхода по сравнению с традиционными являются существенное повышение качества разработанной технологии и резкое сокращение сроков технологической подготовки группового многономенклатурного мелкосерийного производства.

Благосостояние нации висит на кончике резца» - это высказывание классиков трудно переоценить [1-5,10-12]. **Технический отечественный прорыв** в следующий технологический уклад возможен только посредством широкого использования типажей и конструкций качественного ресурсосберегающего инструмента XXI века - УРИ (патенты РФ) в совокупности с первичной подсистемой и подсистемой синтеза многоуровневой базовой групповой технологии (МБГТ) машиностроения – отечественной разработкой, позволяющей осуществлять групповую технологию и поднять качество обработки, производительность и эффективность опытного, серийного многономенклатурного и массового производства.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Митрофанов, С. П. Технология и организация группового машиностроительного производства: в 2-х ч. Ч. 1 Основы технологической подготовки группового производства // С. П. Митрофанов, А. Г. Братухин, О. С. Сироткин и др. – М.: Машиностроение. 1992. – 480 с.
2. Митрофанов, С. П. Технология и организация группового машиностроительного производства: в 2-х ч. Ч. 2 Организация группового производства // С. П. Митрофанов, А. Г. Братухин, О. С. Сироткин и др. – М.: Машиностроение. 1992. – 425 с.
3. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2-х т. Т.1 Организация группового производства. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1983. – 407 с.
4. Синго, С. Быстрая переналадка: Революционная технология производства / Сигео Синго; пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. –384 с.
5. Ракунов, Ю. П. Методология построения подсистемы синтеза многоуровневой базовой технологии в групповом производстве / Ю. П. Ракунов, Н. А. Золотова / Сб. материалов науч.-практ. конф. «Технологическое обеспечение качества машин и приборов». – Пенза, 2004. – С. 210-214.
6. Ракунов, Ю. П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 2. – 2013. – С. 36-48.
7. Ракунов, Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – № 3, 2012. – С.23-31.
8. Ракунов, Ю. П. Подсистема синтеза многоуровневой базовой технологии / Ю. П. Ракунов // Научно-технические технологии в машиностроении. – №10, 2012. – С.36-46.
9. Ракунов, Ю. П. Разработка комплексной САПР групповых технологических процессов / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Боровских А. В. // Механизация строительства. – 2014. – №11. – С.56-60.
10. Ракунов, Ю. П. Методика проектирования групповых инструментальных наладок / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Богацкая И. Г. // Механизация строительства. – 2015. – №2. – С. 56-60.

11. Ракунов, Ю. П. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. Приложение к № 7. – 2015. – С. 1-29.
12. Гладышева, И. В. Роль автоматизации операционных процессов в развитии производственной системы предприятий // Цифровая экономика и «Индустрия-4,0»: проблемы и перспективы: труды науч.-практ. конференция с междунар. участием /под ред. д.э.н. проф. А.В. Бабкина – СПб:Изд-во Политех. Ун-та, 2017. – С.279-287.
13. J. Hendler, “Avoiding Another AI Winter”, *IEEE. Intell, Syst.* – vol. 23. – pp. 2-4. – 2008.
14. Бондаренко, А. В. Факторы обеспечения устойчивого развития предприятий авиационной промышленности / А. В. Бондаренко // Цифровая экономика и «Индустрия-4,0»: проблемы и перспективы: труды науч.-практ. конф. с междунар. участием/под ред. д.э.н. проф. А.В. Бабкина. – СПб: Изд-во Политех. Ун-та, 2017. – С.617-627.
15. Скоробогатов, А. С. Подход к решению задачи обоснования технологии изготовления готовой продукции промышленного предприятия / А. С. Скоробогатов, В. В. Кобзев – С.662-667.
16. P. J. Mosterman and J. Zander, “Industry 4.0 as a Cyber-Physical Systems study”, *Software and Systems Modeling*, vol. 15, pp. 17-29, Feb 2016.
17. Ракунов, Ю. П. Основные научные принципы разработки и реализации системы многоуровневой базовой групповой технологии / Ракунов Ю. П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю // Международный сборник научных трудов «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ». – 2020. – №3(70). – С. 45-56.
18. Ракунов, Ю. П. Применение метода анализа-синтеза для проектирования многоуровневой базовой групповой технологии / Ракунов Ю. П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю // «Автоматизированное проектирование в машиностроении». – СПб: НИЦ МС, 2022. – №12. – С. 65-72.

Поступила в редколлегию 21.02.2023 г.

УДК 536:621.9

¹В. В. Федотов, ²А. Ю. Полубанов, проф., д.т.н. ³Е. С. Киселёв, проф., д.т.н.,
³А. Н. Унянин

¹Филиал ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Сызрань, ²АО «Кардан», г. Сызрань,

³ФГБОУ ВО «УлГТУ», г. Ульяновск, Россия

Тел. / Факс: +7 (927)028-00-10, e-mail: tms10@yandex.ru

К ОЦЕНКЕ ВЗАИМОСВЯЗИ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ ЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК С ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований параметров качества поверхностного слоя шеек шипов крестовины карданного вала в зависимости от параметров режима процесса шлифования и структуры шлифовального круга. Оценивали формирование параметров шероховатости, волнистости, структурно-фазового состава и остаточных напряжений шлифованной поверхности. Структурно-фазовый состав и остаточные напряжения измеряли с использованием аппаратуры рентгеновского типа. Полученные результаты позволили определить условия и режим обработки заготовок, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя, а также дать рекомендации по совершенствованию технологии проведения операции шлифования шеек крестовин карданных валов в условиях АО «Кардан (г. Сызрань).

Ключевые слова: шероховатость, волнистость, структурно-фазовый состав, остаточные напряжения, микротвердость, поверхностный слой, шейки крестовины карданного вала.

Fedotov V. V., Polubanov A. Yu., Kiselev E. S., Unyanin A. N.

THE CEMENTED WORKPIECES GRINDING CONDITIONS AND THE SURFACE LAYER QUALITY PARAMETERS RELATIONSHIP ASSESSMENT

The experimental studies results of the cardan shaft crosspiece journal spikes surface quality parameters depending on the grinding process mode parameters and the grinding wheel structure are presented. The roughness parameters, undulation, structural-phase composition and residual stresses of the polished surface formation was evaluated. The structural-phase composition and residual stresses were measured using X-ray type equipment. The results obtained made it possible to determine the workpieces conditions and processing mode ensuring the surface layer required quality, as well as to make recommendations for technology improvement of the cardan shaft crosspieces journal grinding at the JSC "Cardan (Syzran).

Keywords: roughness, undulation, structural-phase composition, residual stresses, microhardness, surface layer, cardan shaft crosspieces journals.

Проектирование и производство современной техники сопряжено со все более возрастающей долей деталей, изготавливаемых из материалов с уникальными физико-механическими свойствами из высокопрочных, коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных сталей, титановых, алюминиевых и никелевых сплавов.

Разработка технологических процессов изготовления деталей из вышеуказанных материалов связана с необходимостью обеспечения повышенных требований к эксплуатационным характеристикам изделий, а, следовательно, к их геометрическим параметрам и физико-механическим свойствам поверхностных слоёв.

В настоящее время существует достаточно большое количество исследований, свидетельствующих о том, что важнейшее влияние на эксплуатационные свойства деталей (усталостная прочность, коррозионная стойкость, износостойкость и т.д.) оказывает состояние поверхностного слоя детали. Значение данного влияния в большой степени проявляется в автомобилестроении при производстве и эксплуатации нагруженных узлов и механизмов, в частности, деталей шарнира карданного вала.

Эксплуатационные свойства поверхностного слоя крестовины кардана определяют срок службы данного узла, величину нагрузки и крутящего момента, передаваемого через вал на задний мост автомобиля, а также возможность выдерживать ударные воздействия и сопротивляться негативным факторам агрессивной окружающей среды.

Наиболее важными параметрами качества поверхностного слоя, влияющими на эксплуатационные свойства ответственных деталей машин, являются именно физико-механические характеристики материала. При этом многие операции технологического процесса изготовления деталей, в том числе и операции шлифования, сопровождаются значительным теплообразованием, что является причиной возникновения структурно-фазовых преобразований и формирования в поверхностном слое заготовки неблагоприятных остаточных напряжений.

Целью данного исследования является повышение качества поверхностного слоя деталей автомобилей из цементированных сталей за счет выбора рациональных условий и режима шлифовальной операции.



Рисунок 1. Конструкция рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»
1 – гониометрический узел; 2 – рентгеновская трубка; 3 – компьютер; 4 – детектор;
5 – вычислительный блок; 6 – исследуемая деталь

Для оценки качества поверхностного слоя цементированных деталей автомобилей использовали перечисленные ниже параметры:

1. Шероховатость шлифованной поверхности, оцениваемая следующими характеристиками [1].

- высота неровностей профиля по десяти точкам Rz , мкм;
- среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм;
- наибольшая высота неровностей профиля $Rmax$, мкм.

2. Волнистость поверхности.

Среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности Ra , а также другие параметры шероховатости и волнистости, измеряли на профилометре мод. 130.

3. Микротвердость определялась в соответствии с ГОСТ 9450-76 по следующей зависимости:

$$HV = F/S, (1)$$

где F – действующая на индентор твердомера нагрузка, Н; S – площадь поверхности отпечатка индентора в материале исследуемого образца, мм².

Определение микротвердости шлифованной поверхности осуществляли с использованием микротвердомера Tukon 1102/12/02 фирмы Wilson Hardness.

4. Фазовый состав поверхностного слоя шлифованной детали

Фазовое состояние металла поверхностного слоя (ПС) обработанных образцов исследовали с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7» с использованием медного катода (Рис. 1).

После установки подготовленного к измерениям образца выставляли наклон рентгеновской трубки в зависимости от материала исследуемой заготовки (ниже приведен пример для γ - и α -железа).

Соотношение α -железа и γ -железа в объеме поверхностного слоя (ПС) выполняли при настройке трубки медного катода на угол дифракции $2 \cdot \Theta \approx 44^\circ$. Это позволяло достичь максимальной интенсивности пиков феррита (α -железо, плоскость {110}, $2 \cdot \Theta \approx 44,5^\circ$) и аустенита (γ -железо, плоскость {111}, $2 \cdot \Theta \approx 43,5^\circ$), что дало возможность использовать величины интенсивностей их пиков для расчета соотношения объемов этих фаз.

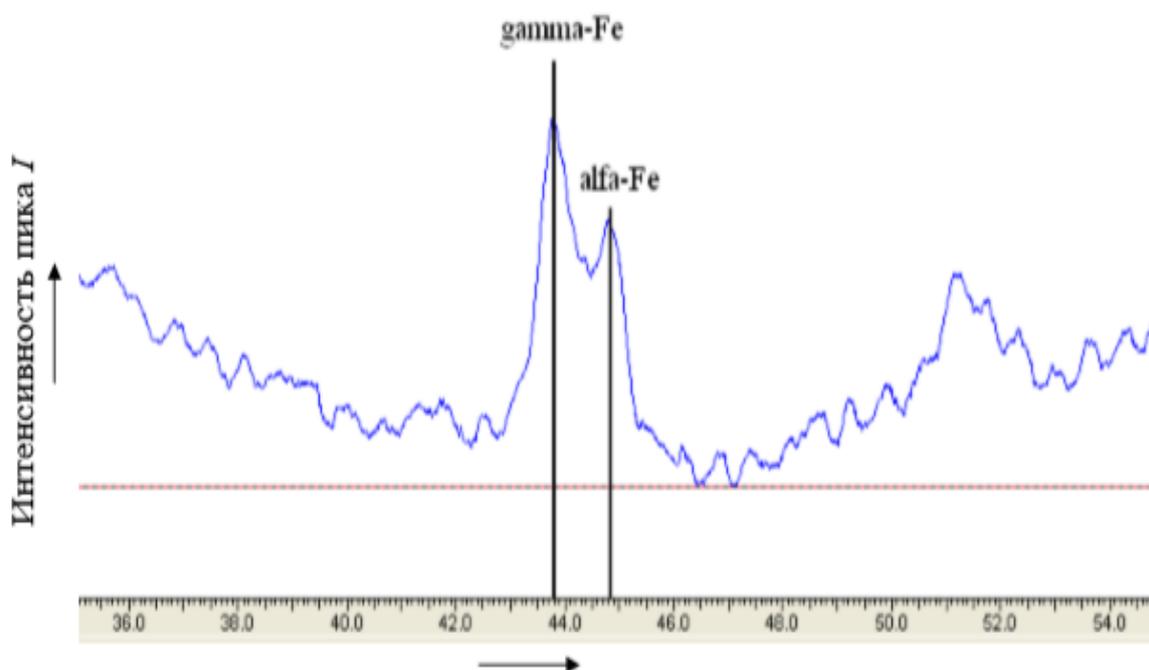


Рисунок 2. Показания рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»

Значения параметров с детектора передавались на персональный компьютер и обчислялись программой MD-10, поставленной вместе с измерительным комплексом «Рикор-7» его разработчиками. После этого определялась экспозиция значений стандартного угла дифракции $2 \cdot \Theta$ по горизонтальной оси и интенсивности пиков I в вертикальной плоскости. Для лучшего отображения выбирали сглаживание спектра по

5 точкам. Пример показаний при исследовании фазового состава двухфазной стали на дифрактометре «Рикор-7» представлен на рис. 2.

Количественное соотношение фаз определили по формуле:

$$K = \frac{I_{\max \gamma \text{ аустенит} - \text{Fe}}}{I_{\max \alpha \text{ феррит} - \text{Fe}}}, \quad (2)$$

где $I_{\max \gamma \text{ аустенит} - \text{Fe}}$, $I_{\max \alpha \text{ феррит} - \text{Fe}}$ – интенсивности пиков, соответствующих аустениту (γ -железо) и ферриту (α -железо).

1. Технологические остаточные напряжения (ТОН) третьего рода оценивали рентгенографическим методом при помощи рентгеновского измерительного комплекса «РИКОР-4». При возникновении в исследуемом образце механических напряжений длина ребер элементарного куба меняется с ориентировкой ребра соответственно с упругими деформациями материала. При падении рентгеновских лучей на образец наблюдается интерференция лучей, рассеиваемых в кристаллической решетке металла.

Этот метод является «прямым» неразрушающим методом контроля остаточных напряжений, принципиальная схема которого представлена на рисунке 3. Данный метод основан на оценке величины деформации кристаллической решетки материала.

При выборе абразивного инструмента для исследования ориентировались на применяемый в действующем производстве автомобильной промышленности в процессе шлифования шлифования заготовок из цементированных сталей, в частности, в условиях АО «Автокомпонент» (г. Ульяновск) и АО «Кардан» (г. Сызрань). Использовали круги 92А F150 O 8 V5, варьируя номером структуры: 8, 12 и 16 [6].

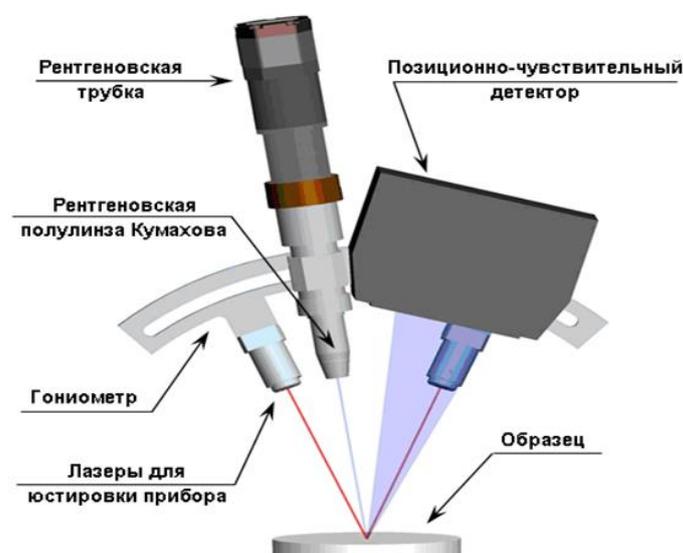


Рисунок 3. Принципиальная схема устройства рентгеновского измерительного комплекса «РИКОР-4»

В качестве образцов для экспериментов на операции бесцентрового шлифования использовали крестовины карданных валов из стали 19ХГН, изготавливаемые на АО «Кардан» (г. Сызрань), после токарной и термической обработки (цементация на глубину 0,8 ... 1,1 мм с последующей закалкой до твердости HRC 58...62).

В процессе шлифования использовалась универсальная биостабильная 2-3%-ная полусинтетическая смазочно-охлаждающая жидкость «Coolant».

При проведении многофакторного эксперимента для оценки качественных характеристик поверхностного слоя шлифованных поверхностей использовали следующие элементы режима [7]: рабочая скорость круга $V_k = 50$ м/с; скорость врезной подачи $V_S = 2,5$ и $1,5$ мм/мин; время выхаживания $\tau = 5$ и 1 с. Снимаемый припуск – $0,13$ мм.

Состав и количество опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1. – Состав опытов

№ серии опытов	Скорость врезной подачи V_S , мм/мин	Время выхаживания τ , с	Номер структуры круга $N_{стр}$	Выходные параметры
1	2,5	5	8	Структурно-фазовый состав (С); остаточные напряжения 3-го рода (ТЗ); параметр Ra шероховатости; средняя высота волн W
2	1,5	5	8	
3	2,5	1	8	
4	1,5	1	8	
5	2,5	5	16	
6	1,5	5	16	
7	2,5	1	16	
8	1,5	1	16	

Обработку и анализ результатов полного многофакторного эксперимента типа ПФЭ 2^3 (этапы исследований № 2 и 3) производили в соответствии с РДМУ 109-77 [8,9].

В табл. 2 представлены средние значения выходных параметров, полученные в трех параллельных экспериментах.

Таблица 2. – Средние значения параметров, полученных в параллельных экспериментах

№ серии опытов	Содержание цементита в поверхностном слое C (%)	Остаточные напряжения III рода T_3 , МПа	Параметр шероховатости Ra , мкм	Средняя высота волн W , мкм
1	13,89	169	0,79	0,57
2	13,06	121	0,73	0,52
3	13,47	159,3	0,87	0,66
4	12,66	109,7	0,81	0,595
5	15,24	180,7	0,98	0,75
6	13,94	130	0,84	0,633
7	14,63	173	1,06	0,865
8	13,56	123,7	0,93	0,7

Минимальные значения остаточных напряжений 3-го рода, полученные при скорости подачи $V_S = 1,5$ мм/мин и времени выхаживания $\tau = 1$ с, составляют $109,7$ МПа при шлифовании кругом 8-й структуры и $123,7$ МПа при шлифовании кругом 16-й структуры. Максимальные значения остаточных напряжений 3-го рода зафиксированы при $V_S = 2,5$ мм/мин и $\tau = 5$ с и составляют 169 и $180,7$ МПа при шлифовании кругом 8-й и 16-й структуры соответственно. Это можно объяснить более высокой температурой поверхностного слоя заготовки и большим периодом действия теплового источника при больших значениях V_S и τ .

При шлифовании кругом 16-й структуры ТОН 3-го рода в среднем на 9% выше, чем при шлифовании кругом 8-й структуры. Это связано с меньшим количеством абразивных зерен на рабочей поверхности круга 16-й структуры. В работе А.Н. Резникова [10] приводится зависимость для расчёта числа работающих зерен:

$$n_p \approx 0,167 \cdot \frac{\beta^*}{\alpha^{3/4} \sqrt{\text{tg} \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{K}}{x^2 \sqrt{1-\varepsilon}} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{1000 \cdot V_k}}, \quad (3)$$

где α – коэффициент формы зерна; β^* – поправочный коэффициент на несимметричное расположение кривой расположения вылетов вершинок зерен в рабочем слое круга; γ – половина средне-вероятного значения угла режущих вершинок зерна; x – среднее значение размера зерна; K – концентрация абразивного материала; ε – относительная критическая глубина заделки зерен; ω – удельная производительность; V_k – скорость круга.

Коэффициент K зависит от структуры круга.

Известно, что при увеличении номера структуры круга уменьшается концентрация зерен. Например, объемное содержание зерен в рабочем слое круга стандартной характеристики со структурой 7 составляет 48 %. В высокопористых кругах со структурой 12 абразив занимает 38 % объема рабочего слоя, а для структуры 16 количество абразивного материала снижается до 30% [11].

С уменьшением количества зерен увеличиваются глубина внедрения их в заготовку, силовые нагрузки, воздействующие на них в процессе обработки, а, соответственно, и локальные температуры. Эти выводы подтверждаются данными Е.П. Калинина [12], который определял максимальную толщину (мм) недеформированной стружки, снимаемой одним зерном, по математической зависимости:

$$a_{z_{\max}} = 2,75 \cdot 10^{-2} \frac{V_3 \left(\frac{d_k \pm D_k}{d_k \cdot D_k} \right)^{0,5}}{V_k} \cdot \frac{t_{\phi}^{0,5} \cdot N}{(31-C)^{0,25} \cdot K_3^{0,75}}, \quad (4)$$

где N – номер зернистости круга по ГОСТ 3647-80; C - номер структуры; K_3 – объемная доля зерна в круге.

Параметр Ra шероховатости и средняя высота волн W шлифованной поверхности снижаются с уменьшением V_S и увеличиваются с уменьшением значения времени выхаживания τ . При шлифовании кругом 16-й структуры значения параметров Ra и W на 19 и 25% выше, чем при шлифовании кругом 8-й структуры, что может быть связано с большим значением глубин внедрения зерен круга 16-й структуры в заготовку.

При шлифовании кругом 12-й структуры получены следующие результаты: $C = 14,56\%$; $T_3 = 173,9$ МПа; $Ra = 0,82$ мкм; $W = 0,602$ мкм. Эти результаты, как и следовало ожидать, занимают промежуточные значения между полученными при шлифовании кругами 8-й и 16-й структуры.

Ниже представлены уравнения регрессии, полученные после обработки результатов полного многофакторного эксперимента.

$$\begin{aligned} C &= 11,36 + 0,8 \cdot V_S + 0,06 \cdot N_{cmp}; \\ T_3 &= 22,33 + 53,83 \cdot V_S + 5,33 \cdot \tau + 3,28 \cdot N_{cmp}; \\ Ra &= 0,74 + 0,063 \cdot V_S - 0,02 \cdot \tau + 0,0049 \cdot N_{cmp}; \\ W &= 0,51 + 0,069 \cdot V_S - 0,014 \cdot \tau. \end{aligned}$$

В уравнении для расчета параметра C значимыми являются два коэффициента – при параметрах V_S и N_{cmp} . Оба этих коэффициента являются положительными, следовательно, с увеличением скорости подачи и номера структуры количество

остаточного цементита увеличивается. Коэффициент при параметре τ является незначимым, что свидетельствует о незначительном влиянии времени выхаживания на содержание остаточного цементита.

В уравнении для расчета остаточных напряжений 3-го рода значимыми оказались коэффициенты перед каждым из параметров – V_S , τ , N_{cmp} . Все эти коэффициенты положительны. Следовательно, с увеличением V_S , τ и N_{cmp} значения остаточных напряжений увеличиваются.

В уравнении для расчета среднего арифметического отклонения профиля Ra положительное значение имеют коэффициенты при параметрах V_S и N_{cmp} , поэтому при увеличении величин этих параметров значение Ra увеличивается. Коэффициент регрессии при параметре τ имеет знак минус, что свидетельствует об уменьшении значения Ra с увеличением времени выхаживания.

Уравнение регрессии для расчета параметра волнистости W содержит лишь два значимых коэффициента, причем коэффициент при параметре V_S является положительным, а при параметре τ – отрицательным.

При взаимодействующих факторах во всех уравнениях не оказался значимым ни один коэффициент регрессии.

Минимальные значения количества остаточного цементита, остаточных напряжений 3-го рода, шероховатости и волнистости получены на режиме: рабочая скорость шлифовального круга $V = 50$ м/с; скорость врезной подачи $V_S = 1,5$ мм/мин; время выхаживания $\tau = 5$ с; номер структуры круга $N_{cmp} = 8$.

Результаты измерения микротвердости заготовок, протшлифованных на вышеприведенном режиме и по технологии, действующей на АО «Кардан» (г. Сызрань) ($V_k = 42,7$ м/с, $V_S = 2$ мм/мин, $\tau = 3$ с, номер структуры круга $N_{cmp} = 8$), приведены в таблице 3.

С увеличением расстояния от наружной цилиндрической поверхности заготовки значения микротвердости уменьшаются. Микротвердость на расстоянии 0,22 мм выше, чем на расстоянии 1,1 мм, на 17 ... 25%. На расстоянии 0,66 ... 1,1 мм от наружной цилиндрической поверхности значения микротвердости практически не меняются.

Таблица 3. Средние значения результатов измерения микротвердости по HV , полученные в параллельных экспериментах

Номер точки	Расстояние от наружной цилиндрической поверхности заготовки, мм	Условия проведения эксперимента	
		$V = 50$ м/с; $V_S = 1,5$ мм/мин; $\tau = 5$ с; $N_{cmp} = 8$	$V = 42,7$ м/с; $V_S = 2$ мм/мин; $\tau = 3$ с; $N_{cmp} = 8$ (технология АО «Кардан»)
1	0,22	751,2	580,5
2	0,44	741,5	514,3
3	0,66	663	458,3
4	0,88	635	458,8
5	1,1	643	464,1

Шлифование на режиме, обеспечивающем лучшие результаты ($V = 50$ м/с; $V_S = 1,5$ мм/мин; $\tau = 5$ с), обеспечивает большие значения микротвердости, чем шлифование на режиме по заводской технологии. В точках № 1 и 2 микротвердость выше на 30 и 44% соответственно; в точках 3, 4 и 5 – выше в среднем на 40%. Это можно объяснить меньшей скоростью врезной подачи и меньшей температурой в зоне шлифования.

Полученные результаты позволяют определить условия и режим обработки заготовок деталей, обеспечивающие требуемое качество поверхностного слоя.

Минимальные значения количества остаточного цементита, остаточных напряжений 3-го рода, шероховатости и волнистости получены на режиме: скорость врезной подачи $V_S = 1,5$ мм/мин; время выхаживания $\tau = 5$ с; номер структуры круга $N_{стр} = 8$.

Шлифование на этом режиме обеспечивает большие значения микротвердости, чем шлифование по заводской технологии.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р 70117-2022. Шероховатость поверхности. Рекомендации по выбору: национальный стандарт РФ. Введ. 2023-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Москва: Стандартинформ, 2022. – 18 с.
2. Ефименко, Л. А. Металловедение и термическая обработка сварных соединений: учебн. пособие. / Ефименко Л. А., Прыгаев А. К., Елагина О. Ю. – М.: Логос, 2007. – 456 с.
3. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры: межгосударственный стандарт. Введ. 1957-07-01 / Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.
4. Кроха, В. А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. – М: Машиностроение, 1968. – 131 с.
5. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу. Ч. 1. Метод измерения: национальный стандарт РФ. Введ. 2008-08-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.
6. Боровский, Г. В. Справочник инструментальщика / Г. В. Боровский, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов; ред. А. Р. Маслов. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2007. – 463 с.: ил.
7. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания. Ч. II. Нормативы режимов резания. – М.: Экономика, 1999. – 474 с.
8. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
9. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов: методические указания. – М.: Изд. стандартов, 1978. – 64 с.
10. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под. ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
11. Старков, В. К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 600 с.
12. Калинин, Е. П. Научные основы интенсивного бесприжогового шлифования сталей и сплавов с учетом степени затупления инструмента: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Е. П. Калинин; Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург: 1995. – 246 с.

Поступила в редколлегию 19.03.2023 г.

УДК 621.838.222

М. П. Шишкарёв, д-р техн. наук, проф.

Донской государственный технический университет, РФ

Тел.: 89081933393; **E-mail:** shishkarev_m_p@mail.ru**УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ**

В статье показано, что введение в принципиальную схему адаптивной фрикционной муфты с одноконтурной отрицательной обратной связью механизма задержки действия управляющего устройства позволило повысить номинальную нагрузочную способность и точность срабатывания муфты. Установлено ограничение порогового значения коэффициента трения по критерию точности срабатывания муфты, до которого происходит задержка действия управляющего устройства.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, нагрузочная способность, точность срабатывания, коэффициент трения, управляющее устройство.

М. P. Shishkarev**IMPROVEMENT OF TECHNICAL AND OPERATIONAL INDICATORS OF
ADAPTIVE FRICTION CLUTCHES**

The article shows that the introduction of an adaptive friction clutch with a single-circuit negative feedback delay mechanism of the control device into the schematic diagram allowed to increase the rated load capacity and the accuracy of the clutch operation. The limitation of the threshold value of the coefficient of friction according to the criterion of the accuracy of the coupling operation, up to which the delay of the control device action occurs, is established.

Keywords: adaptive friction clutch, load capacity, actuation accuracy, coefficient of friction, control device.

1. Введение

Адаптивные фрикционные муфты (АФМ) обладают повышенной точностью срабатывания, которая характеризуется более высокой стабильностью предельной величины вращающего момента [1]. Наряду с этим, АФМ имеют относительно невысокую номинальную нагрузочную способность, являющуюся результатом действия отрицательной обратной связи в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$ (где f_{\min} , f_{\max} – соответственно минимальный и максимальный коэффициенты трения), в том числе при значении коэффициента трения, равном f_{\min} [2–4].

При рекомендуемом способе настройки АФМ, предусматривающем использование в качестве настроенного значения коэффициента трения f_{\min} [5], значение приведенного коэффициента трения меньше его текущего значения в

$$1 + zCf_i \quad (1)$$

раз.

В формуле (1) z – число пар трения фрикционной группы АФМ; f_i – текущее значение коэффициента трения; C – коэффициент усиления (КУ) обратной связи:

$$C = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

где R_{cp} – средний радиус поверхностей трения элементов фрикционных пар; r – радиус окружности, на которой расположены чувствительные элементы управляющего устройства (УУ); α – угол давления чувствительных элементов УУ.

Из равенства (1) следует, что уменьшение номинальной нагрузочной способности АФМ связано с увеличением КУ, которое приводит к повышению точности сраба-

тывания муфты [6, 7]. Следовательно, повышение точности срабатывания АФМ с отрицательной обратной связью неизбежно приводит к ухудшению другого основного эксплуатационного показателя – номинальной нагрузочной способности.

АФМ с отрицательной обратной связью обладают нагрузочной характеристикой $T_i(f_i)$

(где T_i – текущий предельный вращающий момент АФМ), которая представляет собой возрастающую кривую в интервале значений коэффициента трения $f_{min} \dots f_{max}$, поэтому при указанном способе настройки важным представляется, по меньшей мере, исключение действия обратной связи при значении коэффициента трения f_{min} [8].

Цель исследования. Разработка и исследование АФМ с задержкой действия управляющего устройства (УУ) при минимальном коэффициенте трения.

Задачи исследования. 1. Разработка и введение в принципиальную схему АФМ с одноконтурной отрицательной обратной связью механизма задержки действия УУ. 2. Определение порогового значения коэффициента трения, до которого происходит задержка действия УУ. 3. Определение оптимального варианта АФМ с задержкой действия УУ по критерию точности срабатывания муфты.

2. Основное содержание и результаты работы

В связи с этим рассмотрим принципиальную схему АФМ с задержкой действия УУ при минимальном коэффициенте трения, показанную на рис. 1, а. Полумуфты 1 и 2 связаны между собой фрикционной группой, состоящей из дисков трения 3 и 4. Диски 3 соединены со ступицей нажимного диска 5, диски 4 – с барабаном полумуфты 2. Нажимной диск 5 установлен свободно на ступице полумуфты 1.

УУ муфты состоит из тел качения 6, которые размещены с зазором в гнездах с наклонными боковыми стенками, выполненных в упорном диске 7 и нажимном диске 5 (рис. 1, б). Силовое замыкание элементов фрикционных пар осуществляется при помощи пружины 8, передающей силу натяжения через опорный диск 9, соединенный со ступицей полумуфты 1 посредством шпонки 10, и упорного подшипника на нажимной 5 и упорный 7 диски.

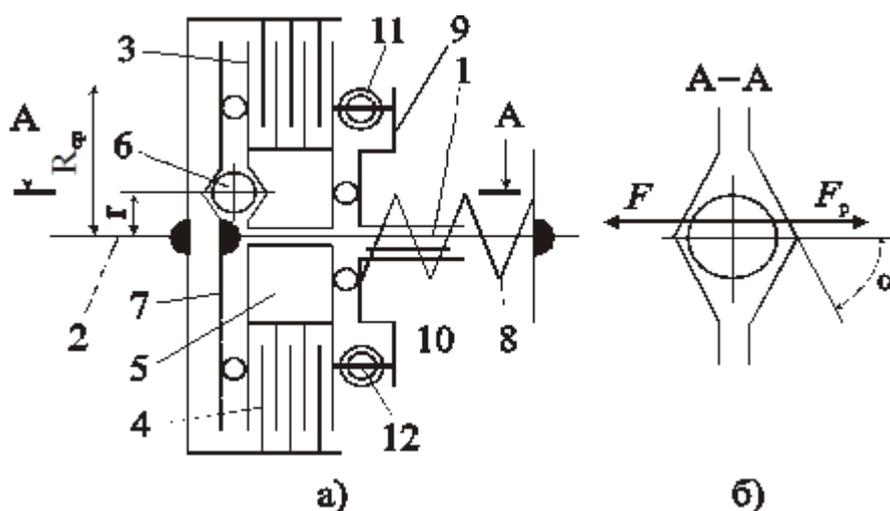


Рисунок 1. Принципиальная схема модернизированной АФМ

Между крайним левым (по рис. 1, а) диском трения 3 и упорным диском 7 установлен упорный подшипник, поэтому фрикционная группа передает полный вращающий момент от одной полумуфты к другой.

Тангенциальные пружины сжатия 11 опираются своими торцами на бобышки 12, которые попарно закреплены на нажимном диске 5 и опорном диске 9. Пружины могут быть установлены в муфту с предварительным натяжением (при использовании АФМ в реверсивном варианте вращения) или устанавливаются без предварительного натяжения. В первом случае пружины устанавливаются попарно между бобышками нажимного и опорного дисков.

Первоначальная суммарная сила натяжения пружин 11 устанавливается из условия равенства нулю величин зазоров между телами качения 6 и боковыми стенками соответствующих гнезд при вращающем моменте, равном

$$T_{\min} = zF_n R_{cp} f_{\min}, \quad (3)$$

где F_n – сила натяжения пружины 8. Остальные обозначения см. выше.

Основываясь на поставленном условии, запишем:

$$F_o + \Delta F_o = \frac{T_{\min}}{R}, \quad (4)$$

где F_o – первоначальная суммарная сила натяжения пружин 11; ΔF_o – величина прироста силы F_o , пропорциональная дополнительной осадке пружин 11, от действия тангенциальной силы; R – радиус окружности, на которой расположены пружины 11.

Величина прироста силы F_o равна:

$$\Delta F_o = cnx, \quad (5)$$

где c – осевая жесткость пружины 11; n – количество пружин 11; x – осадка пружины.

Величина осадки пружины 11 равна:

$$x = 2 \frac{y}{r} R, \quad (6)$$

где y – окружной зазор между телом качения и боковой стенкой гнезда.

В формуле (6) сомножитель 2 учитывает суммарную величину окружного зазора между телом качения и противоположно расположенными на одном элементе боковыми стенками гнезд.

Подставив правую часть равенства (6) в формулу (5) и затем – в выражение (4), найдем

$$F_o = \frac{T_{\min}}{R} - 2ncR \frac{y}{r}.$$

В последней формуле величина вращающего момента T_{\min} определяется по соотношению (3).

При увеличении вращающего момента свыше момента T_{\min} в УУ начинает действовать распорная сила F_{pi} , и величина вращающего момента, который в данный период времени будет передавать АФМ, равна:

$$T_i = zR_{cp} f_i (F_n - F_{pi}). \quad (7)$$

Учитывая, что в соответствии с принятой принципиальной схемой АФМ величина распорной силы равна

$$F_{pi} = \frac{T_i - T_{min}}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

после подстановки последнего соотношения в равенство (7) получаем:

$$T_i = zF_{\pi} R_{cp} f_i \frac{1 + zCf_{min}}{1 + zCf_{max}}. \tag{8}$$

Формула (8) записана с учетом соотношения (2).

Поскольку осевая деформация пружин 11 при увеличении вращающего момента АФМ не изменяется, формула (8) справедлива при всех значениях (кроме значения, равного f_{min}) коэффициента трения, принадлежащих интервалу значений $f_{min} \dots f_{max}$. На основании этого величина коэффициента точности АФМ [9] в данном случае определяется по формуле:

$$K_{\tau} = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{f_{max}(1 + zCf_{min})}{f_{min}(1 + zCf_{max})}. \tag{9}$$

Формула (9) идентична зависимости для вычисления величины коэффициента точности АФМ, в которых УУ действует во всем интервале значений коэффициента трения $f_{min} \dots f_{max}$ [10]. Следовательно, при одинаковых величинах КУ сравниваемые муфты обладают одинаковой точностью срабатывания, т. е. одним из показателей их эффективности. При этом условии номинальная нагрузочная способность исследуемой АФМ выше, чем номинальная нагрузочная способность сравниваемой АФМ, в $(1 + zCf_{min})$ раз. Одновременно с повышением точности срабатывания за счет увеличения

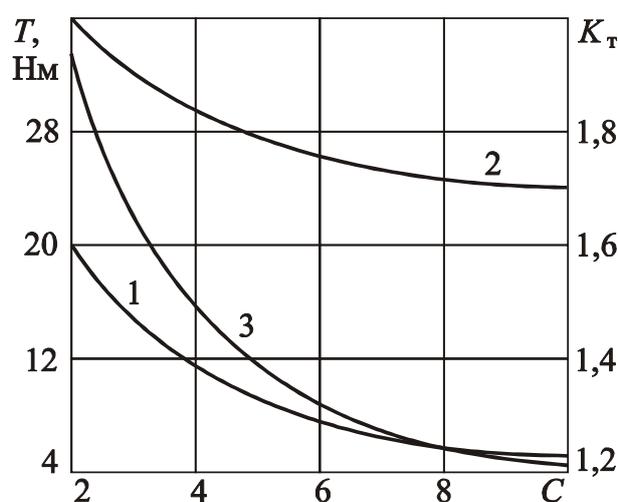


Рисунок 2. Зависимости предельного вращающего момента и коэффициента точности АФМ от КУ.

$f_i = 0,5$.

Анализ графиков показывает, что исследуемая АФМ обладает значительно большей номинальной нагрузочной способностью – в 1,8 раза выше, чем у АФМ с постоянно действующим УУ ($C=2$, кривые 1 и 2). С увеличением КУ номинальная нагрузочная способность исследуемой АФМ снижается медленнее, чем у АФМ с постоянно действующим УУ.

Сравнение точности срабатывания при примерно одинаковых величинах номи-

на КУ возрастает разница в нагрузочной способности сравниваемых муфт.

Изложенное выше иллюстрируется графиками, показанными на рис. 2. Кривая 1 на этом рисунке отражает функцию $T(C)$, она построена по формуле (8). Кривая 2 отражает график аналогичной функции для АФМ с постоянно действующим УУ, она построена по формуле [11]:

$$T_i = zF_{\pi} R_{cp} \frac{f_i}{1 + zCf_i}.$$

Кривая 3 на рис. 2 отражает график функции $K_{\tau}(C)$, она построена по формуле (9). Все графики построены по следующим исходным данным: $z=4$, $F_{\pi}=500$ Н, $R_{cp}=0,1$ м, $f_{min}=0,1$, $f_{max}=0,8$,

нальных вращающих моментов АФМ показывает, что точность срабатывания исследуемой АФМ значительно выше. Например, при $T = 20$ Н·м (кривая 1) величина коэффициента точности равна 1,95, а при $T = 24$ Н·м величина коэффициента точности меньше в 1,6 раза (кривая 2). Поэтому с данной точки зрения можно отметить повышение точности срабатывания исследуемой АФМ с одновременным увеличением номинальной нагрузочной способности. Так, в интервале величин КУ $10 \geq C \geq 2$ величина номинального вращающего момента исследуемой АФМ выше, а коэффициента точности меньше, чем у АФМ с постоянно действующим УУ.

В том случае, когда задержка начала действия УУ происходит до некоторого значения коэффициента трения $f_k > f_{\min}$, величина номинального вращающего момента АФМ определяется по следующим формулам:

– в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_k$:

$$T_i = z F_n R_{cp} f_i, \tag{10}$$

– в интервале значений коэффициента трения $f_i > f_k \dots f_{\max}$:

$$T_i = z F_n R_{cp} f_i \frac{1 + z C f_k}{1 + z C f_i}. \tag{11}$$

Таким образом, в данном случае нагрузочная характеристика АФМ будет состоять из двух участков – прямолинейного, согласно зависимости (10), в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_k$, и криволинейного, в соответствии с зависимостью (11), на остальной части нагрузочной характеристики.

В соответствии с этим, величина коэффициента точности в данном случае равна

$$K_T = \frac{f_{\max} (1 + z C f_k)}{f_{\min} (1 + z C f_{\max})}. \tag{12}$$

Анализ формул (9) и (12) показывает, что при $f_k > f_{\min}$ величина коэффициента точности в последнем случае будет больше при одинаковых значениях параметров z и C . Однако, формула (11) указывает на повышение нагрузочной способности АФМ, отрегулированной по данному способу [12]. Поэтому точность срабатывания АФМ может быть повышена за счет увеличения КУ.

Примем в качестве исходного условия для определения требуемого увеличения КУ равенство $K_T = K_{T1}$, при этом в формуле (9) КУ равен C_1 , а в формуле (12) – C_2 . Очевидно, что $C_2 > C_1$. Приравнивая друг другу правые части формул (9) и (12), находим значение коэффициента трения f_k по следующей формуле:

$$f_k = \frac{(1 + z C_1 f_{\min})(1 + z C_2 f_{\max}) - (1 + z C_1 f_{\max})}{z C_2 (1 + z C_1 f_{\max})}. \tag{13}$$

На прямолинейном участке нагрузочной характеристики величина коэффициента точности АФМ, вычисляемая по формуле

$$K_T = \frac{f_k}{f_{\min}},$$

не должна быть больше его величины, определяемой по формуле (9), на основании чего запишем следующее равенство:

$$f_k = m \frac{f_{\max} (1 + z C_1 f_{\min})}{1 + z C_1 f_{\max}}, \tag{14}$$

где m – коэффициент: $m < 1$.

Приравнивая друг другу правые части формул (13) и (14), получаем:

$$C_2 = \frac{(f_{\max} - f_{\min})C_1}{(1 + zC_1f_{\min})(1 - m)f_{\max}}. \quad (15)$$

Формулы (14) и (15) позволяют определить значение коэффициента трения f_k и величину КУ C_2 , при которых АФМ с задержкой действия УУ до значения f_k обладает одинаковой точностью срабатывания с АФМ, имеющей задержку действия УУ при значении коэффициента трения f_{\min} .

При одинаковой точности срабатывания АФМ с задержкой действия УУ до значения коэффициента трения f_k обладает большей номинальной нагрузочной способностью при значении коэффициента трения f_{\min} по сравнению с АФМ, имеющей постоянно действующее УУ.

Обсуждение и результаты. Принцип задержки действия УУ, реализованный в АФМ с отрицательной обратной связью с помощью введения в ее принципиальную схему специального механизма, позволил снять ограничение максимальной величины КУ и за счет этого решить задачу устранения противоречия между номинальной нагрузочной способностью и точностью срабатывания муфты.

Существует ограничение порогового значения коэффициента трения по критерию точности срабатывания АФМ, которая приближается к точности срабатывания «идеальной» АФМ.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и проектировании модернизированной АФМ с механизмом задержки действия УУ для определения ее конструктивных параметров, обеспечивающих повышение номинальной нагрузочной способности и точности срабатывания.

3. Заключение

1. Введение в принципиальную схему АФМ с одноконтурной отрицательной обратной связью механизма задержки действия УУ позволило повысить номинальную нагрузочную способность и точность срабатывания муфты.

2. Номинальная нагрузочная способность АФМ повышается при увеличении порогового значения коэффициента трения, до которого происходит задержка действия УУ. Существует ограничение порогового значения коэффициента трения по критерию точности срабатывания АФМ.

3. Наибольшими возможностями повышения точности срабатывания обладает вариант АФМ, в котором задержка действия УУ осуществляется при минимальном значении коэффициента трения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения с дифференцированными парами трения (ч. 2) / М. П. Шишкарев // Известия ОрелГТУ. – 2008. – № 3-2/271 (546). – С. 67–71.

2. Шишкарев, М. П. Анализ переходного периода адаптивных фрикционных контактов в условиях положительного прироста коэффициента трения / М. П. Шишкарев // Изв. вузов. Машиностроение. – 2000. – № 3. – С. 14–17.

3. Шишкарев, М. П. Условие и возможность реализации высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт / М. П. Шишкарев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 3. – С. 3–6.

4. Шишкарев М.П., Угленко А.Ю. Анализ эксплуатационных характеристик ва-

риантов адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М. П. Шишкарёв, А. Ю. Угленко // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 8. – С. 44–48.

5. Шишкарёв, М. П. Влияние величины коэффициента усиления на массу адаптивных фрикционных муфт / М. П. Шишкарёв // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 2. – С. 88–93.

6. А. с. 1055915 СССР, МПК³ F 16 D 7/02, F 16 D 13/04. Предохранительная фрикционная муфта / М. П. Шишкарёв (СССР). – № 3475963/25–27; заявл. 28.07.82; опубл. 23.11.83. Бюл. № 43. – 6 с.: ил.

7. Шишкарёв, М. П. Аналитическое обоснование оптимального способа настройки предохранительных фрикционных муфт / М. П. Шишкарёв // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 3–6.

8. Шишкарёв М.П., Лущик А.А. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М. П. Шишкарёв, А. А. Лущик // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 25-28 февраля 2014 г., Ростов н/Д, 2014. – С. 206–209.

9. Шишкарёв, М. П. Математические модели адаптивного фрикционного контакта твёрдых тел 2-го поколения // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVIII междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 «Компьютерная поддержка производственных процессов» / Под общ. ред. В.С. Балакирева – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 72–76.

10. Шишкарёв, М. П. Исследование адаптивной фрикционной муфты с комбинированной обратной связью / М. П. Шишкарёв, Чан Ван Дык // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – № 9. – С. 25–32.

11. Шишкарёв, М. П. Распределение нагрузки в муфте Н.Д. Вернера и выбор её параметров / М. П. Шишкарёв // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 6. – С. 8–11.

12. Шишкарёв, М. П. Ву Тьен Зунг. Практическая точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с переменным значением коэффициента усиления / М. П. Шишкарёв, Ву Тьен Зунг // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 3. – С. 3–7.

Поступила в редколлегию 27.03.2023 г.

УДК 621.793.71

F. I. Panteleenko, a member- correspondent. NAN B, Ph. D., Professor, **V. A. Okovity**, Ph. D., **O. G. Devoino**, Ph. D., Professor, **A. S. Volodko**, **V. A. Sidorov**, Ph. D., associate Professor, **V. V. Okovity**, **A. A. Litvinko**, **V. Yu. Sereda**
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus
Tel. / Fax:+375 17 293-95-99, **E-mail:** *niil_svarka@bntu.by*
V. M. Astashinsky, a member- correspondent. NAS B, D. Phys. - math. n., prof.
A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Tel. / Fax: +375 17 284-24-91, **E-mail:** *ast@hmti.ac.by*

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PRINCIPLES FOR APPLYING A COMPOSITION OPTIMIZED COMPOSITE COATING OF CERAMICS

The article presents the developed technological scheme for applying composition-optimized ceramic composite coating based on $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ and $Al_2O_3-TiO_2-Mo$ materials. It includes a number of technological operations: preliminary preparation of the developed powders and the working surface of the samples, coating, subsequent high-energy processing in order to improve the operational characteristics of the coating. The most promising for obtaining wear-resistant plasma coatings that increase the durability and reliability of mechanisms and machines are those materials that can withstand maximum loads without plastic deformation in friction pairs in a wide range of operating temperatures and have the highest resistance to abrasive wear, the ability to work in aggressive environments and vacuum. The most promising for operation under such conditions are compositions that consist of a ceramic-metal matrix and an oxide component evenly distributed in it. To increase the adhesive and cohesive strength of the plasma coating and reduce the residual stresses formed in the resulting "coating-substrate" system, it is advisable to use pre-spraying of the sublayer. In this case, the sublayer used should have an increased strength of adhesion to the substrate and be characterized by sufficient plasticity and a thermal expansion coefficient that closely corresponds to the coefficient of the material of the outer layer of the formed coating. When forming plasma coatings based on ceramics with the use of metal additives, it is effective to spray intermediate sublayers based on nickel and molybdenum with a size of 0.10-0.20 mm. Structural elements in the working surface of the applied powder materials must be distributed evenly. The level of energy impacts on the layers of the formed coating is correlated with the change in distances during processing. Under shock and wave effects of pulses of the compression plasma flow, plastic deformation and significant compaction of the treated layer of the applied plasma coating occur. Ultrafast cooling and corresponding heat removal to the substrate, after melting of the formed layer with a thickness of about 20-30 microns, is the result of the thermal effect of compression plasma pulses.

Keywords: ceramic-metal plasma coatings, compression plasma flows, processing distance, molded structures, surface layers, molded wear-resistant coatings.

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

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ НАНЕСЕНИЯ ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПО СОСТАВУ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ КЕРАМИКИ

В статье представлена разработанная технологическая схема нанесения оптимизированного по составу композиционного покрытия из керамики на базе материалов $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlTa$ и $Al_2O_3-TiO_2-Mo$. Она включает в себя ряд технологических операций: предварительную подготовку разработанных порошков и рабочей поверхности образцов, нанесение покрытий, последующую высокоэнергетическую обработку с целью улучшения эксплуатационных характеристик покрытия. Самыми перспективными для получения износостойких плазменных покрытий, повышающих долговечность и надежность механизмов и машин, являются те материалы, которые могут выдерживать максимальные нагрузки без пластической деформации в парах трения в большом интервале эксплуатационных температур и обладающих наивысшей стойкостью при абразивном износе, способностью работать в агрессивных средах и вакууме. Наиболее перспективными для работы в таких условиях являются композиции, которые со-

© Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Volodko A. S., Sidorov V. A., Okovity V. V., Litvinko A.A., Sereda V.Yu., Astashinsky V. M.; 2023

стоят из металлокерамической матрицы и равномерно распределенной в ней оксидной составляющей. Для увеличения адгезионной и когезионной прочности плазменного покрытия и снижения формируемых остаточных напряжений в полученной системе "покрытие - подложка" целесообразно использовать предварительное напыление подслоя. При этом используемый подслоя должен иметь повышенную прочность сцепления с подложкой и характеризоваться достаточной пластичностью и коэффициентом термического расширения, близко соответствующим коэффициенту материала внешнего слоя сформированного покрытия. При формировании плазменных покрытий на основе керамики с применением добавок металлов эффективно напыление промежуточных подслоев на основе никеля и молибдена размером 0,10-0,20 мм. Структурные элементы в рабочей поверхности нанесенных порошковых материалов необходимо распределять равномерно. Уровень энергетических воздействий на слои сформированного покрытия коррелируется изменением дистанций при обработке. При ударно-волновом воздействии импульсов компрессионного плазменного потока происходит пластическая деформация и значительное уплотнение обрабатываемого слоя нанесенного плазменного покрытия. Сверхбыстрое охлаждение и соответствующий отвод тепла к подложке, после расплавления сформированного слоя толщиной порядка 20-30 мкм, является результатом теплового воздействия компрессионных плазменных импульсов.

Ключевые слова: металлокерамические плазменные покрытия, компрессионные плазменные потоки, дистанция обработки, сформованные структуры, поверхностные слои, формованные износостойкие покрытия

1. Introduction

Atmospheric Plasma Spraying (APS) is an affordable technique used by researchers to create a range of protective coatings. The use of high temperatures and energy densities makes it possible to deposit coatings of refractory materials such as ceramics and cermets, which are difficult to melt using other traditional thermal spraying processes [1-3]. Compared to ceramic plasma coatings, cermet coatings consisting of ceramic particles bonded to metal particles exhibit superior thermal shock resistance in a high temperature atmosphere. In addition, they share advantages of ceramics and metal, such as hardness and toughness. In addition, the effective use of wear-resistant coatings can be significantly improved by applying a subsequent modifying effect on their structure [4-6]. When processing wear-resistant plasma coatings with high-energy effects, their sources have a number of advantages: firstly, the locality and high concentration of the input energy, which makes it possible to act on the necessary area of the formed wear-resistant coating, thereby not violating, due to the general heating of the entire volume of its microstructure and required properties; secondly, the possibility of strict control of all parameters of influences, which allow to form the structure of the layer being created, to regulate its roughness and the necessary geometric dimensions, to obtain the necessary parameters of wear resistance, total porosity, and hardness. However, one should always keep in mind the ability of a high-energy modification to change and redistribute residual stresses in the formed coating, especially at small coating thicknesses [7,8].

2. Schemes of technological processes for the formation of composition-optimized composite coatings from ceramics

The developed schemes of technological processes for the formation of composition-optimized ceramic composite coatings using additives of refractory metals and subsequent high-energy modification on a steel substrate. They consist of a number of technological operations and include the preliminary preparation of the developed powders and the working surface of the samples, the application of coatings, and the subsequent high-energy processing in order to improve the operational characteristics of the coating. Powder preparation. The particle size of sprayed powders largely determines the properties of the plasma coating, and the stability of the fraction determines the limits of change in properties. The required sieving of powder materials by fractions is carried out in powder material classifiers. The desired particle sizes of the powder material for the formation of NiCrAlI and Mo sublayers by plasma

spraying of the main $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-NiCrAlITa}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-Mo}$ layers are 40-100 μm . To remove traces of adsorbed moisture from the materials, the prepared fractions of the powder material are dried at a temperature not lower than 90 ° C for at least 1-2 hours with a thickness of no more than 20 mm of the powder filling layer on the baking sheet. Preliminary preparation of the surface for plasma spraying of the coating. The surface prepared for spraying should not have dents or cavities. Preliminary control of defects is carried out visually using a measuring magnifier. Cleaning of the surfaces of parts from the presence of traces of oil and other contaminants is carried out in an ultrasonic bath, preferably in an ethyl alcohol environment for at least 1 hour. To increase the adhesive and cohesive strength of adhesion of the applied powder material, an important step in the developed technology is the preparation of the surface of the product for spraying. During cleaning, the samples are processed on a pneumatic abrasive unit using electrocorundum. To prevent defective samples, it is not recommended to use a compressed air pressure of more than 0.6 MPa during processing to supply an abrasive particle. This is followed by blowing the samples with compressed air. To remove abrasive residues from the surface of the product, ultrasonic cleaning in an environment of ethyl alcohol is sometimes used.

Jet-abrasive processing modes:

1. Pressure in the compressed air system - 0.5-0.6 MPa;
2. The distance from the cut of the nozzle of the shot blasting gun to the surface to be treated is 60-80 mm;
3. The angle of inclination of the abrasive jet to the surface of the part - 60-90°C;
4. The abrasive material is zirconium electrocorundum with a grain size of 0.1-0.2 mm.

The presence of a metallic sheen on the treated surface during visual inspection is not allowed. The surfaces of the parts that are not subject to plasma spraying must be reliably protected from the effects of jet-abrasive processing. After the treatment, the part should be blown with a stream of dry compressed air to remove abrasive particles from the surface.

Application of undercoat and top coat. Along with the previously mentioned preliminary surface preparation, in order to increase the adhesive and cohesive strength of the plasma coating and reduce the residual stresses formed in the resulting "coating-substrate" system, it is advisable to use preliminary spraying of the underlayer. In this case, the sublayer used should have an increased adhesion strength to the substrate and be characterized by sufficient plasticity and a thermal expansion coefficient that closely corresponds to the coefficient of the material of the outer layer of the formed coating. When forming plasma coatings based on ceramics using additives of refractory metals, it is effective to spray intermediate sublayers based on nickel and molybdenum with a size of 0.10-0.20 mm. Structural elements in the working surface of the applied powder materials must be distributed evenly. In the technological process developed by us, this is created by using the initial composites in the form of powder materials formed using a plasma torch. The sequence of technological operations:

1. Install the mandrel with samples in the plasma chamber (Figure 1).
2. Unscrew the reducers on gas cylinders for supplying gases to control panels, on the compressed air line, with preliminary draining of condensate from the accumulator.
3. Switch on the control panel of the plasma unit. Visually check the operation of the monitoring sensors.
4. Switch on the powder feeder. Check the supply of conveying gas and the operation of the feeder, turn off and pour material into separate containers of the powder feeder to form sublayers and the main coating layer.

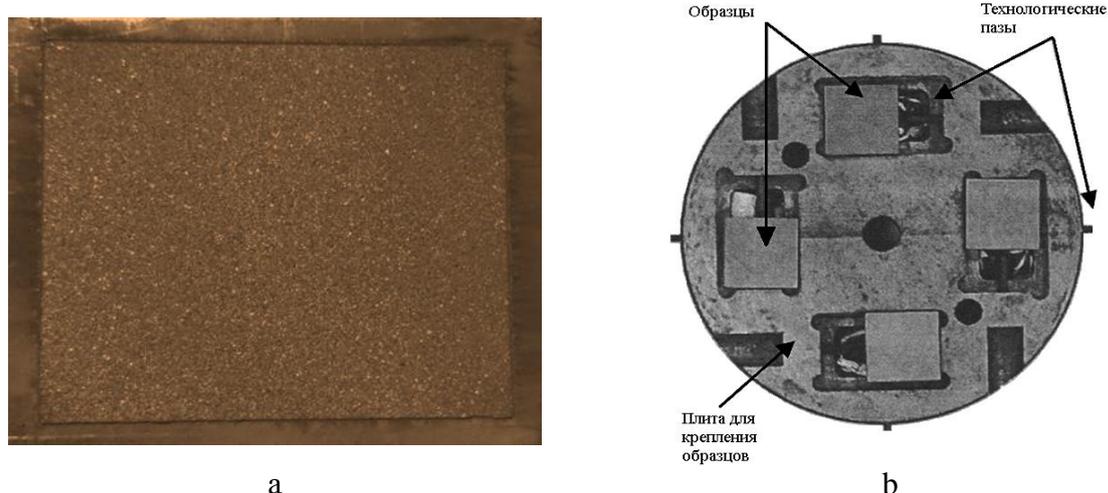


Figure 1. Sample for spraying (a) and mandrel for samples (b)

5. To prevent overheating of the coatings during the spraying process, they must be cooled, either compressed air (GOST 17433-80) or carbon dioxide is used at a pressure of 0.5-0.6 MPa and a coolant flow rate of 100-150 l/min.

6. Set the characteristics of the process for the formation of sublayers from NiCrAlITa on the instruments of the spray control panel: current of the arc of the plasma torch - 550 A; spraying distance (from the torch cut to the sprayed surface) - 100 mm with a flow rate of plasma-forming gas (nitrogen) - 45 l / min and a flow rate of powder material - 4.0 kg / h; fraction of powder material - 40-63 microns.

Set the characteristics of the process for the formation of Mo sublayers on the instruments of the control panel for the deposition process: the arc current of the plasma torch is 600 A; spraying distance (from the torch cut to the surface to be sprayed) - 110 mm with a flow rate of plasma-forming gas (nitrogen) - 50 l / min; powder material flow rate - 4.0 kg / h; fraction of powder material - 40-63 microns.

7. Turn on the powder feeder, turn on the horizontal feed of the carriage with the attached burner (relative travel speed $V_p=300$ mm/s) and apply the undercoat.

8. Set the characteristics of the process to form a wear-resistant coating layer for $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlITa$ on the instruments of the spray control panel: current of the plasma torch arc - 550 A; spraying distance (from the torch cut to the sprayed surface) - 110 mm with the flow rate of plasma gas (nitrogen) - 50 l/min; consumption of compressed refrigerant for cooling 1-1.5 m³/min; pressure $p=4-5$ atm; consumption of powder material - 4.0 kg / h; with a fraction of powder material - less than 40-63 microns.

Set the characteristics of the process for forming the main layer for $Al_2O_3-TiO_2-Mo$ on the instruments of the control panel for spraying: the arc current of the plasma torch is 550 A; spraying distance (from the torch cut to the surface to be sprayed) - 130 mm with a flow rate of plasma gas (nitrogen) - 600 l/min with a flow rate of compressed air for cooling 1-2 m³/min; $p=4-5$ atm. and consumption of powder material - 4.0 kg/hour with a fraction of powder material - less than 40-63 microns.

9. Turn on the powder feeder, turn on the horizontal feed of the carriage with the attached burner (relative travel speed for $Al_2O_3-TiO_2-NiCrAlITa$ - $V_p=300$ mm/s and for $Al_2O_3-TiO_2-Mo$ - $V_p=250$ mm/s) and apply on the main layer.

After applying the main coating layer, the plasma torch is moved from the mandrel with the part, then the spraying unit and the powder feeder are turned off, and the gas supply

is closed. Waiting for the cooling of the sprayed part to carry out quality control of the formed coating. Next, layer-by-layer compression-plasma treatment to modify the formed coating. It is carried out in a vacuum chamber on a quasi-stationary plasma accelerator. The level of energy impacts on the layers of the formed coating is correlated with the change in distances during processing. The technological version of the installation is equipped with equipment that provides a minimum time for managing modification modes, installing and removing products for processing. Technological recommendations (the scheme of the main operations for the formation of composite coatings of increased wear resistance are shown in Figure 2.

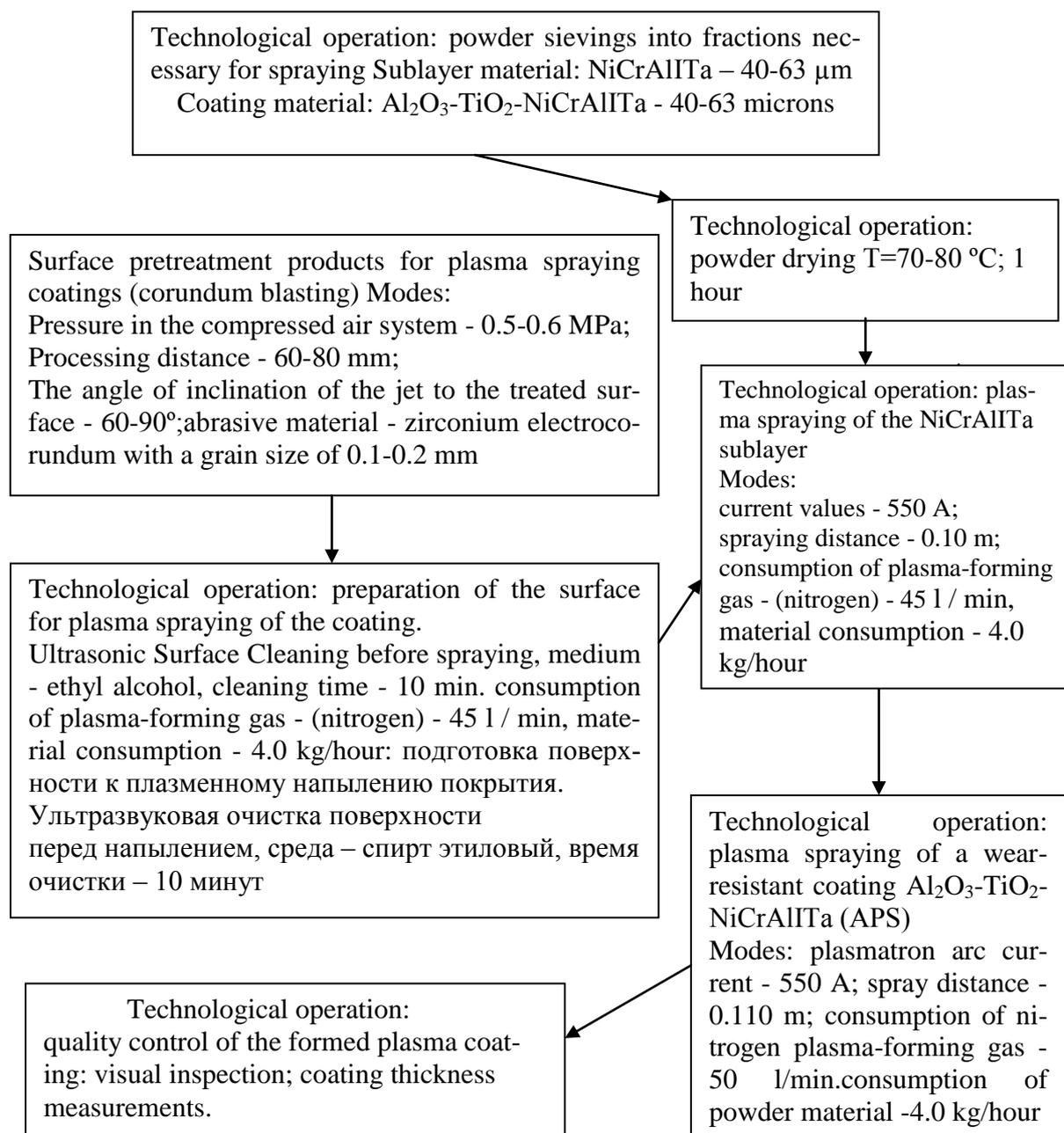


Figure 2. Scheme of the technological process of plasma spraying composite coatings of increased wear resistance based on Al₂O₃-TiO₂-NiCrAlTi powder

3. Conclusion

Based on the review of methods for modifying high-energy plasma coatings based on ceramics, it can be stated that these coatings have a number of significant defects, such as high residual porosity, lamellar structure, and not always sufficient adhesion. Subsequent high-energy processing, as a surface hardening technology, is an effective way to eliminate these defects and improve the quality of the plasma-welded coating. Schemes of technological processes for the formation of composition-optimized ceramic composite coatings using additives of refractory metals and subsequent high-energy modification on a steel substrate are developed. They consist of a number of technological operations and include preliminary preparation of the developed powders and the working surface of the samples, coating, subsequent high-energy processing in order to improve the operational characteristics of the coating. Consistent execution of all developed technological operations leads to the production of high-quality wear-resistant plasma coatings, able to work in conditions of intensive wear and high temperatures.

LITERATURE

1. Obtaining a composite ceramic material for thermal spraying / V.A. Okovity [and others] // Science and technology, BNTU. - Minsk. - 2017. Issue. 3. - P. 193-199.
2. Panteleenko, F.I. Investigation of plasma two-layer composite coatings zirconium dioxide - nichrome / F.I. Panteleenko, V.A. Okovity, E.F. Panteleenko // Actual problems in mechanical engineering, NSTU. - Novosibirsk - 2017. Volume 4. No. 3. - P. 100-105.
3. Formation and study of plasma two-layer composite coatings (viscous metal layer NiCr and solid ZrO₂) / V. A. Okovity [and others] // Science and Technology, BNTU. - Minsk. - 2018. - Issue 1. - P. 21-28
4. Plasmatron for coating / V. A. Okovity [and others] // Science and technology, BNTU. - Minsk. - 2019. - Issue 1. - S. 5-10.
5. Analysis and selection of possible options for spraying composite multilayer coatings from ceramic powders on protective screens / F. I. Panteleenko [et al.] // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2019. - No. 4-2 (336). - P.166-171.
6. Analysis and selection of possible options for spraying composite multilayer coatings from ceramic powders on protective screens / F.I. Panteleenko [et al.] // Dynamics, reliability and durability of mechanical and biomechanical systems: abstracts of the international scientific and technical conference. - 2019. - Moscow. - C.42-45.
7. Formation of plasma powder coatings from ceramics with subsequent high-energy modification to improve the operational characteristics of the surface / F.I. Panteleenko [and others] // Welding in Russia - 2019. Current state and prospects: abstracts of the international conference, Tomsk, September 3-7. 2019 / Tomsk Polytechnic University. in-t; editor: Yu.N. Saraev. - Tomsk, 2019. - P. 198.
8. Okovity, V. A. Formation and study of multilayer composite oxide plasma coatings on elements of screen anti-meteor protection "for an international scientific and technical journal / Okovity V.A., Panteleenko F.I., Devoino O.G., Okovity V.V., Astashinsky V. M., Khramtsov P.P., Chernik M.Yu., Uglov V.V., Sobolevsky S.B. // "Science and technology" BNTU, 2016. - Issue 5.- P.357-364.

Received by the editors 09.03.2023

УДК 622.24.085

А. А. Каракозов, канд. техн. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Россия

E-mail: karakozov@donntu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ БУРОВЫХ СНАРЯДОВ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН НА МОРСКОМ ШЕЛЬФЕ УДАРНЫМ СПОСОБОМ

В статье представлены результаты исследований по созданию технологий и технических средств бурения геологоразведочных и инженерно-геологических скважин, в том числе и на шельфовых нефтегазовых месторождениях, базирующиеся на использовании гидроударных буровых механизмов.

Ключевые слова: шельф, разработка нефтегазовых месторождений, инженерно-геологические изыскания, геологоразведочные работы, бурение, пробоотбор, динамические процессы.

А. А. Karakozov

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF DRILLING PIECE WHEN DRILLING EXPLORATION WELLS ON THE SEA SHELF BY THE IMPACT METHOD

The results of the development of technologies for drilling geological engineering wells during the development of offshore oil and gas fields, based on the use of water driven hammer drilling tools, are presented.

Keywords: shelf, development of oil and gas fields, engineering and geological surveys, drilling, sampling, dynamic processes.

Настоящее время характерно активным освоением углеводородных – нефтяных и газовых – ресурсов морского шельфа, осуществляется добыча твёрдых полезных ископаемых (в том числе, и строительных материалов) на морских месторождениях. Для решения этих задач необходимы большие объёмы геологоразведочного бурения: для разведки полезных ископаемых и для инженерно-геологических изысканий, обеспечивающих строительство морской инфраструктуры по добыче и транспортировке углеводородного сырья. Большинство таких скважин приходится на породы песчано-глинистого комплекса I–IV категорий по буримости при глубинах моря до 60–80 м (весьма редко – до 200 м).

Скважины глубиной до 100 метров могут проходиться как с бурового судна, так и с плавучей самоподъёмной буровой установки (СПБУ). При бурении в инженерно-геологических целях отбор монолитов в мягкопластичных грунтах проводится вдавливаемыми пробоотборниками, а отбор монолитов и проб в плотных, полутвёрдых глинистых грунтах и песках различной плотности – гидроударными буровыми снарядами (ГБС) или гидравлическими забивными пробоотборниками (ГЗП), реализующими ударный способ погружения в горную породу. В других случаях ГБС и ГЗП могут использоваться по всей глубине скважины.

По заданию ГАО «Черноморнефтегаз» была разработана технология поинтервального бурения (рис. 1) и технические средства для её реализации, в том числе и гидроударные буровые снаряды и гидравлические забивные пробоотборники [1, 2].

Суть технологии заключается в следующем (рис. 1). С СПБУ спускается колонна обсадных труб диаметром 219 или 245 мм. Её башмак устанавливается выше дна моря на расстоянии 1,5–2 м. Затем спускается колонна обсадных труб диаметром 146 мм, предназначенная для крепления скважины в процессе проходки. Если первый рейс по отбору пробы планируется проводить ГБС, то колонну останавливают на расстоянии 0,5 м от дна во избежание заклинивания снаряда. Если же планируется использовать вдавливаемый пробоотборник, то колонну опирают на дно. После этого начина-

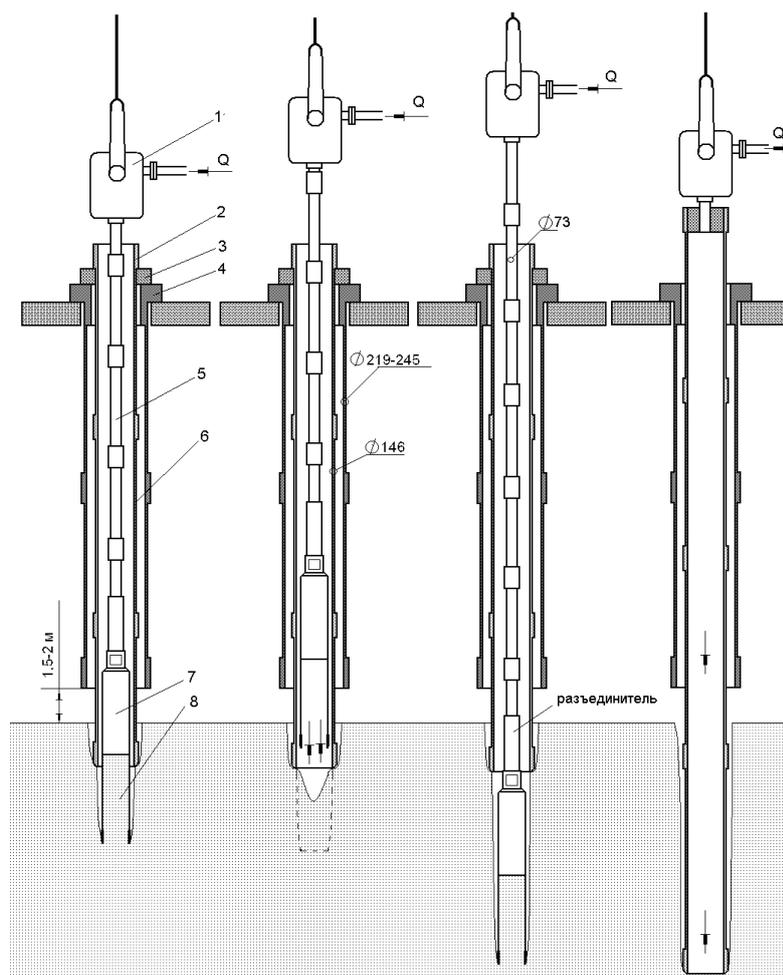


Рисунок 1. Технологическая схема поинтервальной проходки скважин с СПБУ: 1 – вертлюг-сальник; 2 – муфта обсадной колонны $\varnothing 146$ мм; 3 – хомут; 4 – головка обсадной колонны $\varnothing 219-245$ мм; 5 – бурильные трубы $\varnothing 73$ мм; 6 – обсадная колонна $\varnothing 146$ мм; 7 – ГБС (ГЗП); 8 – керн; Q – подача жидкости.

на СПБУ, где из колонковой трубы извлекается керн. Обсадную колонну диаметром 146 мм заглубляют в грунт на глубину, не превышающую длину рейса.

Второй и последующие рейсы выполняются следующим образом. ГБС спускается в скважину на бурильной колонне момента появления разгрузки инструмента. Если она произошла в момент, когда ГБС не дошёл до забоя, то это свидетельствует об частичном обрушении стенок скважины. Тогда к верхней бурильной трубе присоединяются бурильные трубы с вертлюгом-сальником таким образом, чтобы при дальнейшей подаче снаряда обеспечивалась установка ГБС на забой и проходка на длину рейса. Запускается буровой насос, и рабочая жидкость подается в ГБС с расходом, достаточным для срабатывания его нижнего пускового узла, обеспечивающего размыв пород на забое скважины. В таком режиме ГБС опускается на глубину выше отметки забоя скважины на 0,1 м.

После этого насос кратковременно выключается, и пусковой узел возвращается в исходное положение, обеспечивающее отбор пробы грунта. При помощи питателя в нагнетательную линию сбрасывается шарик. Буровой насос снова включается. Срабатывает верхний пусковой узел и запускается гидроударник. Выполняется бурение на

ется отбор проб.

В зависимости от средства отбора керна предусматривается применение двух компоновок бурового снаряда:

1. При бурении тугопластичных глин, суглинков, песков различной консистенции – гидроударный буровой снаряд (забивной пробоотборник) с диаметром корпуса 108 мм, спускаемый в скважину на бурильных трубах диаметром 73 мм;

2. В мягкопластичных грунтах – вдавливаемый пробоотборник с диаметром корпуса 102 мм, спускаемый в скважину на бурильных трубах диаметром 73 мм, при этом над пробоотборником устанавливается секция УБТ диаметром 89 мм массой не менее 2-2,5 т, обеспечивающая внедрение пробоотборника в глинистые грунты.

При первом рейсе производится бурение на заданную длину рейса (обычно – до 3 м). После выключения гидроударника ГБС на бурильных трубах поднимается

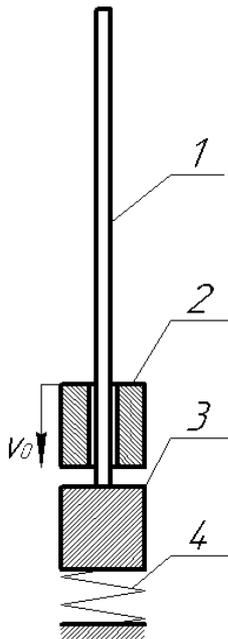


Рисунок 2. Модель ударного бурения: 1 – стержень (бурильные трубы); 2 – боёк (масса M); 3 – пробоотборник (масса M_0); 4 – грунт с упругой характеристикой.

заданную длину рейса. Расход жидкости уменьшается до остановки гидроударника, ГБС поднимается в полость обсадных труб, а после выключения насоса – на поверхность для извлечения керна.

После углубки скважины на длину обсадной трубы (9–12 метров) обсадная колонна диаметром 146 мм наращивается ещё одной трубой с установленным в верхней части вертлюгом-сальником. Затем обсадная колонна с расхаживанием и промывкой спускается до достигнутого ранее забоя скважины.

Данная технология и технические средства прошли апробацию при выполнении инженерных геотехнических исследований площадки под строительство платформы блок-кондукторов Субботинского нефтегазового месторождения в Черном море. С СПБУ «Сиваш» была пробурена скважина глубиной 78 м, при этом было отобрано 60 проб (из них 30 – монолиты).

Результаты испытаний в производственных условиях показали возможные пути совершенствования данной технологии, в том числе, с точки зрения выбора рациональной компоновки бурового снаряжения, использования бурильных труб меньшего диаметра, статических и динамических утяжелителей, определения места установки разъединителя и т.д.

При проведении этих исследований были рассмотрены вопросы определения параметров динамических процессов в бурильных трубах при ударном способе проходки скважин, который реализуется при использовании гидроударных буровых снарядов или забивных пробоотборников.

В частности, была рассмотрена следующая модель (рис. 2). Упругий стержень длиной l с массой единицы длины m и жёсткостью EF соединён с сосредоточенной массой M_0 , по которой со скоростью v_0 ударяет масса M . Система опирается на упругое основание с жёсткостью c_0 . Динамические процессы такой системы с распределёнными параметрами описываются волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - c^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{q(x,t)}{m}, \tag{1}$$

где u – перемещение сечения стержня с координатой x в момент времени t (ось x направлена вверх от массы M_0); c – скорость распространения упругих деформаций; q – интенсивность возмущающей распределённой нагрузки (для нашей задачи её нет).

Решение однородного уравнения, полученного из (1), известно в виде [3]:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \sin(\omega_n t + \mu_n). \tag{2}$$

Уравнение перемещений сечений стержня $u(x)$ можно принять в начальных параметрах:

$$u(x) = u_0 \cos kx + \frac{N_0}{kEF} \sin kx. \tag{3}$$

Если усилие в начале координат N_0 выразить через перемещение u_0 , то получим решение в собственных функциях $X(x)$:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \sin(\omega_n t + \mu_n), \quad (4)$$

где n – номер произвольной гармоники колебаний с частотой ω_n и начальной фазой μ_n , которые определяются из граничных и начальных условий через волновые числа k_n :

$$\omega_n = k_n c = k_n \sqrt{\frac{EF}{m}} \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \mu_n = \frac{u_0}{v_0} \omega_n, \quad (6)$$

Поскольку начало координат принято на нижнем конце стержня, то решение уравнения (1) можно выразить через один начальный параметр u_0 , используя граничное условие на нижнем конце стержня – уравнение динамического равновесия всех сил, приложенных к массам M и M_0 :

$$N_0 + c_0 u_0 + M^* \ddot{u}(0) = 0,$$

где $M^* = M + M_0$.

Так как ускорение движения масс $\ddot{u}(0) = -\omega^2 u(0)$, то с учетом частоты колебаний (5) получим:

$$N_0 = u_0 \left(\frac{M^* k^2 EF}{m} - c_0 \right) = u_0 k EF \left(\xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right), \quad (7)$$

где: $\xi = \frac{M^*}{ml}$ – отношение сосредоточенных масс к массе стержня, $\lambda = kl$ – собствен-

ные числа трансцендентного частотного уравнения, $\bar{c} = \frac{c_0 l}{EF}$ – коэффициент жесткости упругого основания.

С учетом усилия (6) уравнение перемещений сечений (2) можно представить в собственных функциях $X(x)$:

$$u(x) = u_0 \left[\cos kx + \left(\xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \sin kx \right] = u_0 X(x). \quad (8)$$

Так как на стержне с распределенной массой m имеется сосредоточенная масса M^* , то собственные функции будут ортогональными с весом.

Весовую функцию для нашего случая находим по теореме Бетти [3]:

$$\rho(x) = m(1 + \xi l \delta(x)), \quad (9)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака.

Используя граничное условие ($x=l, N(l)=0$), с учётом (7) получаем частотное уравнение

$$\left(\xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \cdot \operatorname{tg} \lambda = 1. \quad (10)$$

Из условия возбуждения собственных колебаний начальной скоростью движения v_0 при $u_0=0$ на основании (6) находим $\mu=0$.

Рассмотрим начальное условие, требующее, чтобы при $t=0$ скорость движения всех сечений была равна нулю, кроме сечения, по которому наносится удар:

$$\dot{u}(x, 0) = v_0 e^{-x}.$$

Так с учётом квадрата нормы собственных функций Δ_n^2 находим амплитудное перемещение

$$u_0 = v_0 \frac{2\xi l}{\omega l \Delta_n^2} = v_0 \frac{2\xi l}{\lambda c \left[X(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}$$

и уравнение движения сечений

$$u(x, t) = v_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\xi l \cdot X_n(x) \sin \omega_n t}{\lambda_n c \left[X^2(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}. \quad (11)$$

К этому решению нужно добавить воздействие внезапного приложения веса Q от груза массой M . Уравнение движения сечений от внезапного приложения груза Q будет иметь вид:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} 2Q \frac{X_n(x)(1 - \cos \omega_n t)}{m \cdot k_n^2 c^2 \cdot l \Delta_n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Ql}{EF \lambda^2} \cdot \frac{X_n(x)(1 - \cos \omega_n t)}{\left[X^2(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}. \quad (12)$$

Суммируя (10) и (11), в итоге получаем:

$$u(x, t) = 2 \frac{Ql}{EF} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos k_n x + \left(\xi \lambda_n - \frac{\bar{c}}{\lambda_n} \right) \sin k_n x}{\lambda_n^2 \cdot \left[\left(\cos \lambda_n + \left(\xi \lambda_n - \frac{\bar{c}}{\lambda_n} \right) \right)^2 + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda_n^2} \right]} \cdot \left(1 - \cos \omega_n t + \sqrt{\frac{v^2 \eta}{gf} \lambda_n^2} \right), \quad (13)$$

где $\eta = \frac{M}{ml}$, $f = \frac{Ql}{EF}$ – квазистатическое растяжение стержня от падающего груза.

Из (13) дифференцированием находим уравнение внутренних усилий:

$$N(x, t) = 2Q \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n} \cdot \frac{-\sin kx + \left(\xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \cos kx}{\left[\left(\cos \lambda + \left(\xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \right)^2 + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]} \cdot \left(1 - \cos \omega_n t + \sqrt{\frac{v^2 \eta}{gf} \lambda_n^2} \right). \quad (14)$$

Оно позволяет определить максимальный динамический коэффициент для нашей задачи:

$$k_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2 \lambda_n^2}{gf} \eta}. \quad (15)$$

Приведенная выше методика позволяет определять параметры динамических процессов в бурильной колонне при ударном бурении горных пород, в частности гидроударными буровыми снарядами и забивными пробоотборниками.

Для совершенствования технологии бурения ГБС по результатам его эксплуатации были проведены дополнительные исследования по оценке влияния компоновки низа бурильной колонны на механическую скорость бурения.

Компьютерное моделирование проводилось на основании ранее проведенных

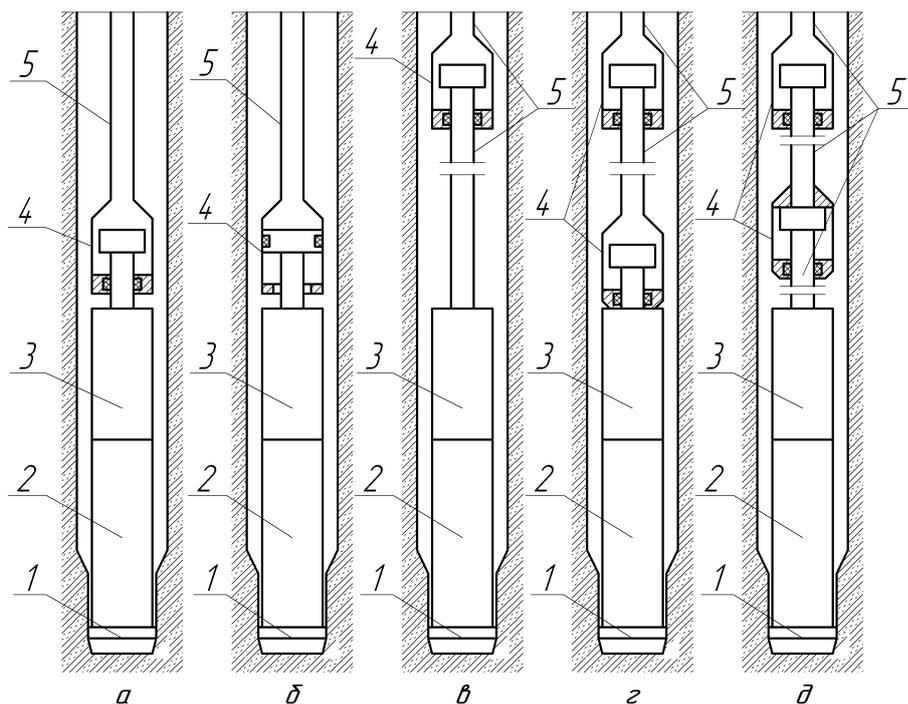


Рисунок 3. Схемы возможных компоновок низа буровой колонны при эксплуатации ГБС: 1 – башмак, 2 – колонковый набор, 3 – гидроударник с распределительными узлами, 4 – разъединитель, 5 – буровые трубы.

гетические и эксплуатационные параметры гидроударных буровых снарядов типа ПБС-110. При моделировании были рассмотрены пять компоновок низа буровой колонны, схемы которых представлены на рис. 3.

В двух первых компоновках (рис. 3 а, б) ГБС отделён от буровой колонны разъединителем, который обеспечивает его свободное заглубление в грунт без взаимодействия с буровыми трубами. Отличие заключается в лишь конструкции разъединителя, которая определяет значение дополнительной статической нагрузки, действующей на снаряд за счёт давления промывочной жидкости в буровых трубах при отборе пробы. В третьей компоновке (рис. 3 в) между снарядом и разъединителем устанавливается секция буровых труб, выполняющая функции статического утяжелителя. Четвёртая компоновка (рис. 3 г) предусматривает наличие двух разъединителей: один устанавливается непосредственно над снарядом, а второй – в колонне буровых труб на различной глубине. Это даёт возможность использовать участок буровой колонны между разъединителями как динамический утяжелитель, имеющий возможность ударного взаимодействия со снарядом. Пятая компоновка (рис. 3 д), в сущности, является комбинацией предыдущих двух компоновок, что позволяет создавать дополнительное статическое и динамическое нагружение снаряда при отборе пробы. Разъединители, используемые в трёх последних компоновках, могут иметь различные конструкции, соответствующие как первой, так и второй компоновкам. Кроме особенностей конструктивного исполнения компоновок при моделировании дополнительно учитывалось влияние глубины моря и работы насосного блока бурового снаряда на процесс его погружения в грунт, исследованное ранее [8]. Некоторые результаты компьютерного моделирования для отбора пробы на глубине 100 м представлены в табл. 1.

По результатам компьютерного моделирования можно сделать следующие вы-

исследований для гидроударных буровых снарядов погружных установок типа УМБ-130 [8, 9]. Исходными данными для моделирования являлись силы сопротивления, рассчитанные по методике И.Г. Шелковникова [10] на основании реальных характеристик грунтов, полученных ЗАО «Компания «Юговостокгаз» при статическом зондировании разреза в нескольких метрах от пройденной скважины, а также конструктивные, энергетические, эксплуатационные параметры гидроударных буровых снарядов типа ПБС-110.

воды.

Таблица 1 – Изменение механической скорости бурения (м/мин) для различных компоновок низа бурильной колонны при эксплуатации буровых снарядов типа ПБС-110

Сопротивление внедрению ГБС, кН	Схема компоновки, рис. 3				
	а	б	в	г	д
30	1,2	1,92 (+60%)	1,615 (-16%)	2,03 (+6%)	1,307 (-32%)
50	0,57	0,69 (+21%)	0,563 (-18%)	0,72 (+4%)	0,243 (-65%)
70	0,375	0,426 (+14%)	0,345 (-19%)	0,504 (+18%)	0,402 (-6%)
90	0,28	0,308 (+10%)	0,248 (-19%)	0,39 (+27%)	0,188 (-39%)
110	0,223	0,241 (+8%)	0,194 (-19%)	0,33 (+37%)	0,172 (-29%)

Примечание. 1. Прирост механической скорости бурения для компоновки, выполненной по схеме рис. 3б, рассчитан по сравнению с компоновкой рис. 3а, а для компоновок, выполненных по схемам рис. 3 в, г, д, – по сравнению со схемой рис. 3б. Массы утяжелителей для компоновок по схемам рис. 3 в, г, д – 100 кг.

Значения механической скорости бурения (табл. 1), полученные для базовой компоновки (рис. 3а), в целом соответствуют данным эксплуатации буровых снарядов ПБС-110 при отборе проб песков в скважине на Субботинском нефтегазовом месторождении, что позволяет рассматривать их как подтверждение разработанной компьютерной модели.

Из табл. 1 видно, что использование разъединителя с большей рабочей площадью поршня (рис. 3 б), воспринимающей давление жидкости, более эффективно по сравнению с применением базовой компоновки (рис. 3 а) во всём спектре пород.

Анализ применения различных видов утяжелителей при использовании разъединителя показал, что применение статического утяжелителя не даёт положительного эффекта – механическая скорость бурения неизменно падает. Это также свидетельствует о том, что попытка увеличить длину рейса за счёт роста длины колонковой трубы приведёт к снижению механической скорости бурения.

А использование динамического утяжелителя даже небольшой массы может дать существенное повышение механической скорости бурения, особенно в более твердых породах. При этом с увеличением массы утяжелителя свыше 3–4 масс снаряда наблюдается однозначный рост скорости бурения, особенно в более мягких породах. А при росте массы утяжелителя до этого предела механическая скорость бурения меняется почти периодически, причём имеются значения масс утяжелителя, при которых механическая скорость бурения будет ниже, чем при использовании компоновки с одним разъединителем (рис. 4). Анализ этих зависимостей показывает, что при вышеописанной технологии бурения (рис. 1) на глубинах отбора пробы свыше 40 м от уровня воды можно использовать компоновки с разъединителем (рис. 3 а, б), но бурильные трубы должны подаваться в скважину свободно и находится в контакте с верхней частью ПБС-110. Это позволит использовать всю бурильную колонну в качестве динамического утяжелителя и даст существенный прирост механической скорости бурения за счёт того, что колонна будет ограничивать подскок снаряда над забоем, но не будет влиять на величину энергии, передаваемую снаряду от бойка гидроударника.

Одновременное использование статического и динамического утяжелителя также не даёт положительного эффекта. При этом наблюдается резкое снижение механической скорости бурения, как при росте массы статического утяжелителя, так и при росте силы сопротивления внедрению снаряда в грунт.

Результаты по использованию статического утяжелителя в буровом снаряде показывают, что в скважинной компоновке обязательно должен присутствовать разбеднитель, устанавливаемый непосредственно над снарядом.

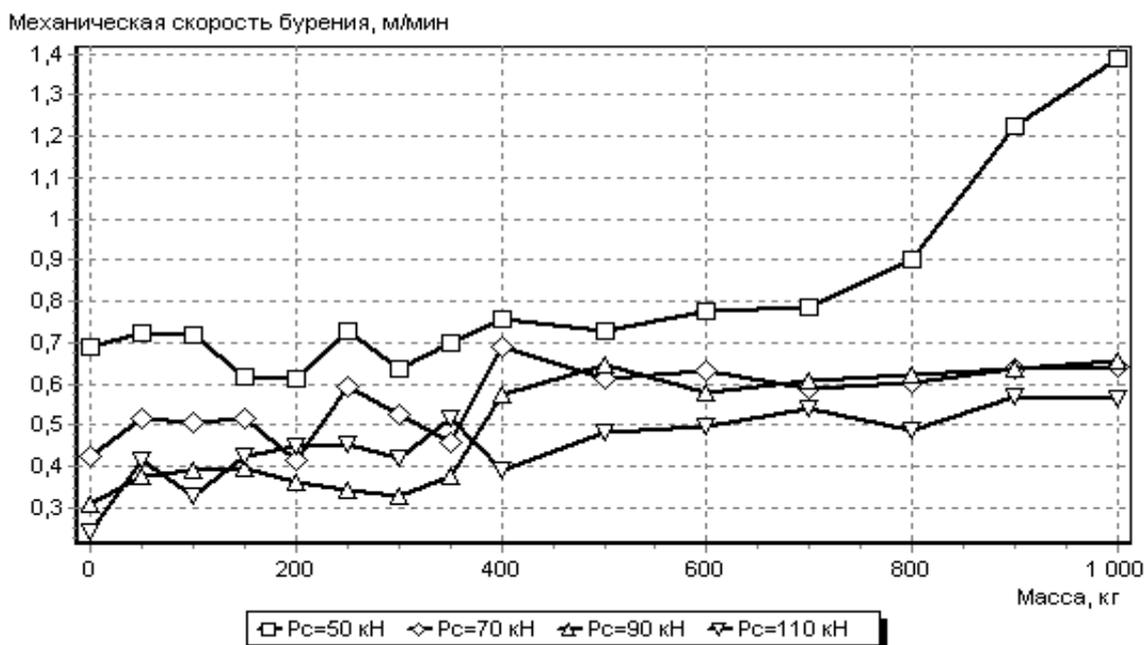


Рисунок 4. Графики зависимостей механической скорости бурения по результатам компьютерного моделирования отбора проб в скважинах снарядами ПБС-110 от массы динамического утяжелителя (P_c – сила сопротивления внедрению).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Каракозов, А. А. Совершенствование технических средств и технологий отбора проб грунта при бурении геотехнических скважин с плавучих самоподъёмных установок на шельфе Чёрного моря / А.А. Каракозов, О. И. Калиниченко, П. В. Зыбинский, С. Н. Парфенюк, А. В. Хохуля, П. Л. Комарь // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения / Сборник научных трудов. – Вып. 11 – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2008. – С. 66–74.
2. Каракозов, А. А. Об использовании забивных пробоотборников с гидравлическим приводом при реализации технологии поинтервального бурения геотехнических скважин с буровых судов и самоподъёмных буровых установок/ А. А. Каракозов // Научные труды ДонНТУ, Серия «Горно-геологическая». – Вып. 2(17). – Донецк, ДонНТУ, 2012. – С. 173–178.
3. Шевченко, Ф. Л. Строительная механика. Специальный курс. Динамика упругих стержневых систем. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. – 293 с.
4. Каракозов, А. А. Оценка влияния конструктивных особенностей буровых снарядов на процесс их погружения в донные отложения при бурении разведочных скважин на шельфе / Научные труды ДонНТУ, Серия «Горно-геологическая». – Вып. 96. – Донецк, ДонНТУ, 2005. – С. 157–161.
5. Каракозов, А. А. Сравнительная теоретическая оценка влияния применения утяжелителей и колонковых наборов с подвижными трубами на эффективность процесса бурения донных отложений гидроударными буровыми снарядами / Наукові праці

ДонНТУ, Серія «Гірничо-геологічна». – Вип. 111. – Т.2. – Донецьк, ДонНТУ, 2006. – С. 113–118.

6. Шелковников, И. Г. Использование энергии удара в процессах бурения. – Л.: Недра, 1977. – 159 с.

Поступила в редколлегию 29.03.2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Зародов М. С., Зародова А. Н., Майстров Ю. В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ДЛЯ СТАЛИ 08ПС	3
Колганова Е.Н., Мельникова Е.П., Лебедев В.А., Шишкина А.П. РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ	9
Кудрявцев В. Н., Парамонова В. А. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕКОТОРЫХ НОРМАЛИЗОВАННЫХ СТАЛЕЙ	19
Михайлов А.Н., Котляров В.Б., Котляров Б.С., Котляров С.Б. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГМТ ОСИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕС ПРИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ ПЕРЕДАЧ В КПП БЕЗ РАЗРЫВА ПОТОКА ПЕРЕДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ	25
Понамарева Е.А., Попович С.А., Пешко В.А., Анастасьев А.В. СИНТЕЗ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ОБРАБОТКИ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	36
Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ ПОДСИСТЕМ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ГРУППОВОГО ПРОИЗВОДСТВА	46
Федотов В. В., Полубанов А. Ю., Киселёв Е. С., Унянин А. Н. К ОЦЕНКЕ ВЗАИМОСВЯЗИ УСЛОВИЙ ШЛИФОВАНИЯ ЦЕМЕНТИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК С ПАРАМЕТРАМИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ	57
Шишкарев М.П. УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ	65
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Volodko A. S., Sidorov V. A., Okovity V. V., Litvinko A. A., Astashinsky V. M. DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PRINCIPLES FOR APPLYING A COMPOSITION OPTIMIZED COMPOSITE COATING OF CERAMICS	72
Каракозов А. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ БУРОВЫХ СНАРЯДОВ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН НА МОРСКОМ ШЕЛЬФЕ УДАРНЫМ СПОСОБОМ	78

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Astashinsky V. M.	72
Devoino O. G.	72
Litvinko A. A.	72
Okovity V. A.	72
Okovity V. V.	72
Panteleenko F. I.	72
Sidorov V. A.	72
Volodko A. S.	72
Абрамов В. В.	46
Анастасьев А.В.	36
Зародов М. С.	3
Зародова А. Н.	3
Каракозов А. А.	78
Киселёв Е. С.	57
Киселица Д. О.	57
Колганова Е.Н.	9
Котляров Б.С.	25
Котляров В.Б.	25
Котляров С.Б.	25
Кудрявцев В. Н.	19
Лебедев В.А.	9
Майстров Ю. В.	3
Мельникова Е.П.	9
Михайлов А. Н.	25
Парамонова В. А	19
Пешко В.А.	36
Полубанов А. Ю.	57
Понамарева Е.А.	36
Попович С.А.	36
Ракунов А. Ю.	46
Ракунов Ю. П.	46
Унянин А. Н.	57
Федотов В. В.	57
Шишкарев М. П.	65
Шишкина А.П.	9

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

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

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

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

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

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

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

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

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

Языки представления рукописей русский и английский.

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА

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

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино- и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения.

2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.

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

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

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

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

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

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

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

СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ

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

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;

- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;

- формулирование цели и постановка задач работы;

- представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов, формулирование рекомендаций;

- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

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

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

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

3. Графический материал (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в формате *.bmp, *.gif, *.psx, *.dwg, *.jpg - размерами не менее 60x60 мм внедренными объектами (по ходу материалов). Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рисунок 3. Схема устройства. Текст названия рисунка группируется с рисунком. Каждый рисунок должен иметь один интервал сверху и снизу.

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

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

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

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

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

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

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

СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:

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

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

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

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

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

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

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

7. Введение (Introduction). (12 pt)

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

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

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

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

10. Заключение (Conclusion) (12 pt)

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

11. Литература (References). (12 pt)

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

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

Тел./факс: +7-856- 301-08-40.

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

<http://ptsm.donntu.ru>

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

Образец оформления материалов
УДК 621.85.05-034(12 pt)

И. И. Иванов, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)
Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)
Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)
Тел./Факс: +7 (856) 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.ru (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

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

(пустая строка - 12 pt)

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

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

(пустая строка - 10 pt)

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

(10 pt)

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

*The efficient design of assembly machinery is vitally important
..... as noun description of functions of presented in the paper.*

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

(пустая строка - 12 pt)

1. Введение (12 pt)

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

(пустая строка - 12 pt)

2. Основное содержание и результаты работы (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы
информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

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

где k_m - элемент множества;

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

(пустая строка - 12 pt)

3. Общий алгоритм и рекомендации (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм

..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

4. Цифровые модели (12 pt)

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

(пустая строка - 12 pt)

5. Заключение (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов

..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности

..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации

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

..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

ЛИТЕРАТУРА:

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

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

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

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

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

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

6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин // Научно-технический журнал «Научно-технический журнал». – М.: Машиностроение, 2014. - № 9. – С. 11-17.

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

(пустая строка - 12 pt)

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

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Выпуск 4 (83)' 2023

Главный редактор

д-р техн. наук, проф. А. Н. Михайлов

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Технический редактор Л. Б. Ступакова

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГОУВПО «ДОННТУ»,
+7 (856) 337-17-33, 335-75-62

Адрес редакции: ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, тел. +7 (949) 306-08-79,
+7 (856) 301-08-05.

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

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