

Вып. 3 (82)' 2023 **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120
**ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 3 (82)' 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 3 (82)' 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 675.055.165.001.76

Г. А. Бахадиров, д-р техн. наук, проф., **З. А. Рахимова**, мл. н. с.
Институт механики и сейсмостойкости сооружений Академии наук Республики
Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан
Тел. / Факс: (+99871) 262-71-52; E-mail: instmech@rambler.ru

ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА РАЦИОНАЛЬНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ОПОРНЫХ ПЛИТ МЕЖДУ ПАРАМИ ВАЛОВ

В этой статье исследуются факторы, влияющих на рациональное перемещение n опорных плит между парами валов. Теоретическое исследование динамику движения n опорных плит между валковыми парами с учетом влияющих ряда факторов, именно: диаметра вала, толщины покрытия валов и его физико-механические свойств, геометрических размеров опорной плиты, силы давления, силы натяжения цепи.

Ключевые слова: пара валов, плоский материал, опорная плита, угол охвата, сила тяжести, сила трения, сила гравитации.

G. A. Bahadirov, Z. A. Rakhimova

STUDY OF FACTORS AFFECTING THE RATIONAL MOVEMENT OF BASE PLATES BETWEEN PAIRS OF SHAFTS

This article explores the factors affecting the rational movement of n base plates between pairs of shafts. Theoretical study of the dynamics of movement of n base plates between roll pairs, taking into account a number of influencing factors, namely: the diameter of the shaft, the thickness of the roll coating and its physical and mechanical properties, the geometric dimensions of the base plate, the pressure force, the chain tension force.

Keywords: pair of shafts, flat material, base plate, wrap angle, gravity, friction, gravity.

1. Введение

В настоящее время в мировом масштабе большое внимание уделяется повышению качества изделий из кожи за счет использования энерго- и ресурсосберегающих технологий в производстве кожгалантереи. В нашей стране развитие кожевенной промышленности является одним из важных экономических направлений, и его значение в производстве товаров народного потребления можно обосновать статистическими данными. В результате технологической модернизации и локализации за последние годы объем экспорта увеличился со 105 млн долларов до 421 млн долларов, доля готовой продукции увеличилась с 32% до 78%.

В мире ведутся научно-исследовательские работы, направленные на разработку новых научно-технических решений ресурсосберегающих технологий и технических средств по повышению качества кожевенной продукции при отжиме. В этом направлении, в частности, приоритетными считаются исследования, направленные на обоснование кинематических, динамических и технологических показателей валковых машин для механической обработки кожевенных полуфабрикатов. В связи с этим, уделяется особое внимание разработке энергоресурсосберегающей технологической валковой машины, отжимающей лишнюю влагу из кожполуфабрикатов и сглаживающее ее, обеспечивающей высокое качество работы и экономию энергии и ресурсов, при предварительной механической обработке кожполуфабрикатов, а также обоснованию ее технологического процесса, параметров и режимов работы [1].

В мире в производстве обуви, одежды и других кожгалантерейных изделий, а также в отделке мебели и салонов автомобилей большое значение имеет кожевенное сырье, полученное путем обработки шкур различных видов животных. В связи с этим

при производстве качественных кожевенных изделий использование высокопроизводительных способов обработки кожевенного сырья и валковых технологических машин имеет особое значение. В настоящее время принимаются масштабные меры по снижению трудоемкости и энергоемкости производства кожевенного сырья, разработке высокоэффективной техники и методов, повышающих эффективность технологических процессов переработки. При реализации этих задач наряду с качественной переработкой кожевенного сырья для кожевенных изделий важное значение имеет создание технически и технологически модернизированных машин, отвечающих технологическим требованиям.

В работе [2-3] изучалось определение сорбционных свойств влаги кожи крупного рогатого скота статическим гравиметрическим методом при температурах 300, 400, 500, 600 и 700°C.

С увеличением влажности как энтальпия сорбции, так и энтропия десорбции увеличиваются до максимума, а затем резко уменьшаются с увеличением влажности. Энтальпия адсорбции уменьшается с увеличением влажности. Энтальпия адсорбции уменьшается с увеличением влажности. Тогда как при увеличении содержания влаги до максимума 6,29 Дж/К. моль энтропия адсорбции возрастает без проблем. Распределяющее давление увеличивается с увеличением активности воды. Кажется, что, точная интегральная энтальпия уменьшается, а затем увеличивается стать асимптотической. Точная интегральная энтропия уменьшается с увеличением влажности. Сушка сырья на кожевенных заводах является одним из наиболее энергоемких процессов и наиболее важным этапом влажной обработки. Оптимизация сушки очень перспективна для снижения энергопотребления, улучшения качества продукции и одновременного улучшения параметров процесса сушки. Действительно, необходимо анализировать тепло и масса обмен изделия при сушке. Одновременно может ясно объяснить сложность явлений передачи тепла, массы и импульса сушки. При работе с пористой средой многие физические изменения в изделии во время этого процесса усложняют проблему. Хорошее знание теплофизических свойств материалов помогает совершенствовать процесс их сушки, графики сушки и эффективно использовать его для достижения оптимальных качеств [4-6]. Для регулярной обработки целых шкур площадью до 5 м² используемых в изготовлении высококачественных товаров народного потребления, таких как обувь, мебель и отделка салона автомобиля требуется одинаковая толщина по всей поверхности. Регулярная обработка до 5 м² натуральной кожи для высококачественных товаров. Точная регулировка толщины достигается расчесыванием. В промышленных масштабах роторным ножом снимают мясо с полуфабрикатов, регулируя тем самым заданную толщину и создавая гладкую поверхность. В этих исследованиях [7-9] на основе изучения процессов взаимодействия в системе была разработана технология крашения хромовой кожполуфабрикатов дермально-коллагеновыми красителями-титановыми соединениями.

Экономическая эффективность кожевенной промышленности республики и полное удовлетворение потребности населения в изделиях из натуральной кожи зависит от качества используемого кожевенного материала. Качество кожевенного сырья и материалов зависит от различных факторов: происхождения животного (вид, порода, пол, возраст животного, потомства), климата, условий содержания и кормления животного, времени года, в которой снималась шкура и, конечно же, технологии подготовки сырья.

2. Основное содержание и результаты работы

Цель применения отечественных валковых машин на кожевенных предприятиях нашей республики состоит в том, что валковые машины, обрабатывающие кожевенное сырье (отжим, выравнивание, резка и др.) привезенные из зарубежья экономически очень дороги. Только финансово богатые кожевенные предприятия могут позволить себе эти дорогие машины. Небольшие кожевенные предприятия не имеют такой возможности. Валковые машины, созданные в нашей республике в результате научных исследований, экономически дешевы и по механической обработке кожполуфабрикатов не уступают зарубежным валковым машинам. В связи с этим в целях развития малых кожевенных предприятий в нашей республике в результате наших научных исследований получен патент на изобретение IAP 06628 Центра интеллектуальной собственности Республики Узбекистан на машину для механической обработки единичных плоских материалов. Два сглаживающих вала и два отжимных вала расположены друг над другом, каждая пара которых установлена симметрично в направлении передачи кожи, опорная плита, состоящая из двух симметричных половин, перемещается между сглаживающим и отжимным валами для одновременной обработки обеих половин кожи с целью сгибания и продвижения обработанной кожи. На рис. 1 представлена схема механической обработки штучных плоских материалов.

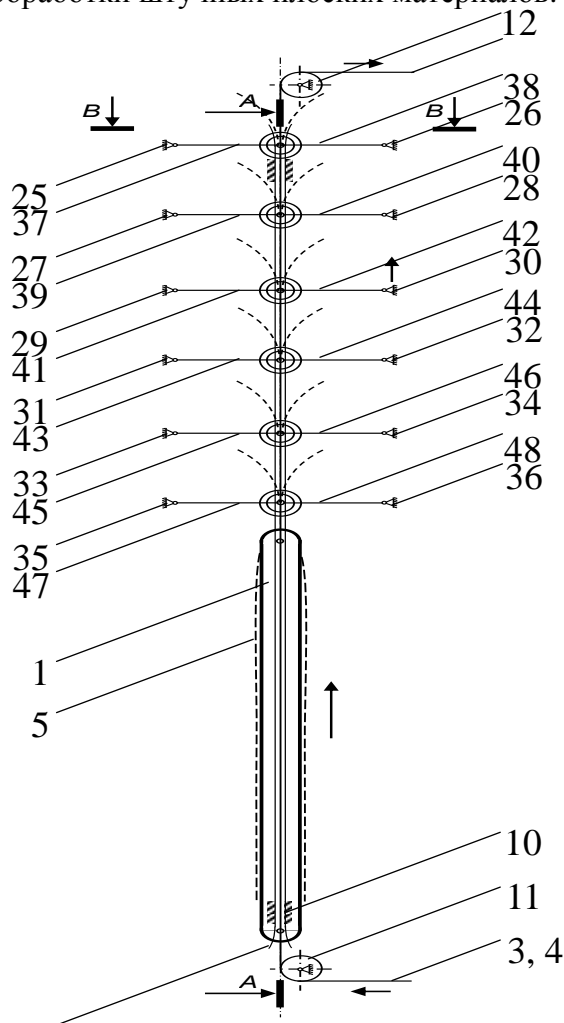


Рисунок 1. Схема машины для механической обработки штучных плоских материалов

Предлагаемая машина для механической обработки штучных плоских материалов имеет ряд инновационных достижений по сравнению с существующими машинами:

- повышается качество продукции при механической обработке плоских штучных материалов, в частности кожевенного полуфабриката;

- снижается расход энергии на единицу продукции; увеличивается срок службы рабочих органов машины;

- заменяет импортные установки и системы, необходимые для автоматизации технологических процессов [10].

3. Общие рекомендации

В ходе исследования был рассмотрен следующий вопрос на основании патента на изобретение. В начале были изучены факторы, влияющие на рациональное перемещение n опорных плит между парами валов. В предыдущих исследованиях мы исследовали движение одной опорной плиты между парами валов. На рациональное перемещение n опорных плит между парами валов влияет несколько параметров, перечислим каждый из них по порядку: диаметр валов, толщина покрытия валов и его физико-механические свойства, геометрические размеры опорной плиты, сила давления, сила натяжения цепи, покрытие плиты конфигурации опорной плиты, сила инерции рассматриваемой системы, размеры кожполуфабриката, его физико-механические свойства. Влияние всех этих параметров на рассматриваемую систему считается значительным. Кратко остановимся на каждом из перечисленных выше параметров.

Величина диаметра валов влияет на количество отжатой жидкости в процессе отжима из кожевенного полуфабриката. Материал, используемый для покрытия валов, также играет важную роль в поглощении влаги кожполуфабриката. В промышленности валы часто покрывают тканью моншон марки БМ и ЛАШ. Отличие этих покрытий в том, что 94% состава покрытия моншон составляет шерсть, поэтому покрытие моншон хорошо впитывает жидкость. Ткань ЛАШ служит долго, но плохо впитывает жидкость. Толщина моншонных покрытий на валах бывает до 8-10 мм. Кожполуфабрикат передается в зону обхвата двумя парами валковых пар, зацепленно к опорной плите. По схеме на рисунке 1 длина опорной плиты равна расстоянию между осями валковых пар. Также конфигурация опорных плит влияет на качество материала и количество отжатой жидкости. На рассматриваемую систему также действует ряд сил, это: сила давления, сила трения, сила натяжения цепи, сила реакции, сила тяжести и силы инерции валов. Дадим краткое описание каждой силы, действующей на систему. Силы, действующие вертикально на поверхность тела, называются силами даления. Трение – это процесс механического сопротивления, когда твердые тела, соприкасающиеся друг с другом, или соприкасающиеся друг с другом углы тела движутся и перемещаются относительно друг друга. Сила взаимодействия между соприкасающимися поверхностями двух тел называется силой трения. Если одним из объектов, на которые действует сила, является пружина, резина, цепь, нить, канат, кабел, то действующую на него силу назовем натяженной силой. Натяжение – это сила тяги. Произведение ускорения движущейся материальной точки в направлении, противоположном ее ускорению, на массу этой материальной точки называется силой инерции. Значит, все перечисленные выше параметры рассматриваются как факторы, влияющие на рациональное перемещение n опорных плит между валковыми парами, которые помогают выполнить процесс (то есть отжим и выравниванию кожполуфабриката валковыми парами) в полной мере. Для этого необходимо определить, в какой степени каждый параметр зависит от рассматриваемого процесса.

В ходе исследований с использованием общей модели динамики было построено это уравнение для рассматриваемого процесса.

$$\begin{aligned} &(-2P_g + 2\Phi_{2,3} + G)(R + r + \delta)\cos\psi\delta\psi + 2Q(R + r + \delta)\sin\psi\delta\psi + \\ &+ (-2P_{g1} + 2\Phi_{4,5} + G)(R + r + t_0 + h_0)\cos\varphi\delta\varphi + 2Q(R + r + t_0 + h_0)\sin\varphi\delta\varphi - 2M_{кр}\delta\psi - \\ &- \sum_{i=1}^n (G - P - \Phi_1)_i (2r \cos\psi\delta\psi)_i - \sum_{i=1}^n (G - P - \Phi_1)_i (2r \cos\varphi\delta\varphi)_i = 0, \quad (i = 1...n). \end{aligned}$$

где- P_g – сила тяжести разглаживающих валов, P_{g1} – сила тяжести отжимных валов, $\Phi_{2,3}$ – сила инерции разглаживающих валов, $\Phi_{4,5}$ – сила инерции отжимных валов, G – таговая сила цепи действующая на опорную плиту, Q – сила давления действующая на валы; $M_{кр}$ – крутящий момент.

В исследовательской работе было построено несколько графиков на основе решений, полученных относительно радиуса валов, вытекающего из общего уравнения динамики. На рисунках 2 построен график зависимости радиуса выпрямляющих валов от тяговой сила цепи при числе опорных плит, равном $n=1, 5, 10$. Из графиков видно, что по мере увеличения числовых значений силы тяговой силы цепи в один, пять и десять раз по количеству опорных плит увеличиваются и числовые значения радиуса валов. И в этом случаи увеличение количества опорных плит не влияет на значения радиуса валов, только увеличение тяговой силы влияет на диаметр валов. На рисунках 3 построен график зависимости радиуса выпрямляющих валов от радиуса опорных плит при числе опорных плит, равном $n=1, 5, 10$. По результатам на графике мы можем видеть, что по мере увеличения численных значений радиусов опорных плит численные значения радиусов валов также увеличиваются, но изменение радиуса валов не зависит от количества опорных плит.

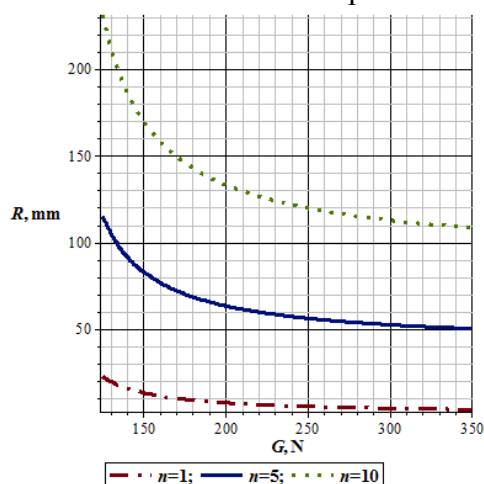


Рисунок 2. График зависимости радиуса выпрямляющих валов от силы тяги цепи (график построен при количестве опорных плит равном $n=1,5,10$)

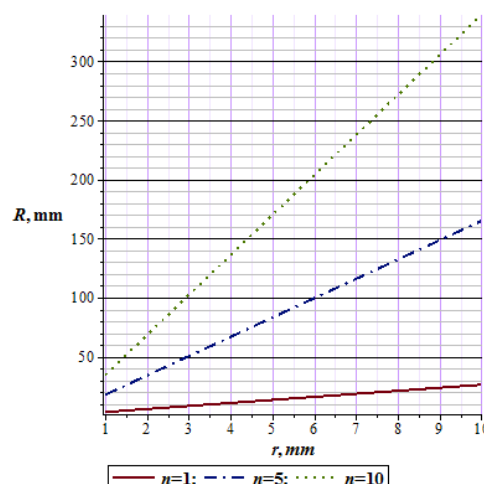


Рисунок 3. График зависимости радиуса выпрямляющих валов от радиуса опорных плит (график построен при числе опорных плит, равном $n=1,5,10$)

4. Заключение

Если сделать окончательный вывод по рассмотренной исследовательской работе, то на основе полученных уравнений и построенных графиков можно сделать следующие выводы. Из всех графиков видно, что в валковых машинах вертикального

типа увеличение количества опорных плит не влияет на численные значения радиуса вала и угла охвата. На изменениям радиуса валов и угла охвата большое влияние оказывают изменения толщины опорных плит, изменения высоты, за счет увеличения числа опорных плит, увеличения силы тяжести и силы инерции и увеличение числовых значений силы тяги в цепи, где опорные плиты движутся последовательно, изменение значений силы отжимных давлений, изменение толщины моншонного покрытия, увеличение начальной толщины кожполуфабриката изменение толщины ножей выпрямляющих валов и другие параметры. Из этих выводов следует, что на практике при изготовлении валов для валковых машин вертикального типа диаметр вала следует выбирать исходя из приведенных выше соображений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рахимова, З. А. Совершенствование конструкции и методы расчета валковой машины механической обработки кожевенных полуфабрикатов: дис. ... д-ра техн. наук / З. А. Рахимова; ТТЭСИ. – Ташкент, 2022. – 113 с.
2. Naima Benmakhlouf, Soufien Azzouz, Afif Elcafsi “The determination of isosteric heats of sorption of leather: Experimental and mathematical investigations” // *Arabian Journal of Chemistry*. Vol. 13, Issue 2, February 2020, P. 4286-4293.
3. Fakhfakh, R. “Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of bovine leather” / Fakhfakh R., Mihoubi D., Kechaou N. // *Heat and Mass Transfer*, 2018 – Springer. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-017-2223-0>.
4. Benmakhlouf, N. *Moisture sorption isotherms of leather* / Benmakhlouf N., Azzouz S., Khedhira H. // *Journal Soc. Leather Technol.* – 2016. – P. 77-83.
5. Крылов, А. В. Фрикционное взаимодействие валов модулей в зоне контакта / А. В. Крылов, Т. П. Туцкая, Ю. Г. Фомин, Г.А. Хосровян // *Технология текстильной промышленности*. – №5 (371). – 2017. – С. 181-184.
6. Appiah-Brempong, M. An insight into artisanal leather making in Ghana. *J Leather Sci Eng* / Appiah-Brempong M., Essandoh H. M., Asiedu N. Y. – 2, 25. – 2020. <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00039-8>.
7. Navarro, D. Life cycle assessment and leather production. *J Leather Sci Eng*. / Navarro D., Wu J., Lin W. et al. – 2, 26. – 2020. – <https://doi.org/10.1186/s42825-020-00035-y>
8. Tilman Witt, Heat development at the knife roller during leather shaving / Tilman Witt, Anke Mondschein, Jens-Peter Majschak and Michael Meyer // *Journal of Leather Science and Engineering*. – 2021. – P. 2-15. – <https://doi.org/10.1186/s42825-021-00057-0>.
9. Danylkovych, A. Improving the process of dyeing a leather semi-finished product by titanium compounds / A. Danylkovych, V. Lishchuk, A. Zhygotsky // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – № 6/6 (84). – P. 29-35.
10. Патент UZ № IAP 06628. Машина для механической обработки штучных листовых материалов / Бахадиров Г. А., Шернаев А. Н., Рахимова З. А.; опубл. 30.12.2021, Бюл. Агентства по интеллектуальной собственности РУз. №12 (248). – 78 с.

Поступила в редколлегию 24.02.2023 г.

УДК 621.01: 62-883

В. Е. Брешев, д-р техн. наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганская Народная Республика, Россия

Тел./Факс: +79591596616, E-mail: veb_lug@mail.ru

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОШПИНДЕЛЯ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ КОНИЧЕСКИХ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

В статье представлены методика проведения и результаты вычислительных экспериментов, выполненных в среде САПР (CAD/CAE) по исследованию характеристик высокоскоростного пневмошпинделя новой конструкции – на регулируемых конических аэростатических опорах. Шпиндель предназначен для высокоскоростной и высокопроизводительной механической обработки металлов и монокристаллов. Его основным техническим преимуществом является регулируемость статических и динамических характеристик в процессе эксплуатации для точной настройки под требования техпроцесса обработки, что повышает её качество и производительность. В компьютерных вычислительных экспериментах исследуются интегральные статические характеристики – несущая способность, жёсткость, расход технологического воздуха и динамические – собственные частоты колебаний, амплитуды вынужденных колебаний и реакции на дисбаланс, на их основе проверяется эффективность предложенной модернизации.

Ключевые слова: шпиндель, коническая аэростатическая опора, интегральные характеристики.

V. E. Breshev

COMPUTATIONAL EXPERIMENTS TO STUDY CHARACTERISTICS OF PNEUMATIC SPINDLE ON ADJUSTABLE CONICAL AIR STATIC SUPPORTS

The article presents the methodology for conducting and the results of computational experiments performed in the CAD environment (CAD / CAE) to study the characteristics of a high-speed pneumatic spindle of a new design - on adjustable conical aerostatic supports. The spindle is designed for high-speed and high-performance machining of metals and single crystals. Its main technical advantage is the controllability of static and dynamic characteristics during operation for fine tuning to the requirements of the processing technology, which increases its quality and productivity. In computer computational experiments, the integral static characteristics - bearing capacity, stiffness, process air consumption and dynamic - natural oscillation frequencies, amplitudes of forced oscillations and responses to unbalance are investigated, on their basis the effectiveness of the proposed modernization is checked.

Keywords: spindle, conical aerostatic support, integral characteristics.

1. Введение

В современном общем машиностроении и станкостроении интенсивно внедряются технологии и оборудование высокоскоростной и высокопроизводительной механической обработки материалов. Наиболее широкое применение она получила в аэрокосмической отрасли – при производстве лопастей турбин, деталей и корпусов турбокомпрессоров; в медицине – при производстве механизмов приборов, имплантатов и хирургического инструмента; в автомобильной промышленности – при производстве блоков цилиндров, трансмиссии и турбокомпрессоров; в химической промышленности и газодобывающей отрасли – при производстве пресс-форм и штампов для литья пластмасс под давлением и штамповки изделий из металла, изготовления рабочих колёс детандеров и компрессоров [1]. При высокоскоростной механообработке (ВСО) материалов происходит увеличение скорости резания в 5-10 раз – до 200 м/с и подачи – до

15 000 мм/мин.

ВСО характеризуется уменьшением сил резания, создающих момент сопротивления и изгибающие силы на валу, что связано со снижением коэффициентов трения и уменьшением сечения стружки. Наряду с увеличением отводимого тепла со стружкой (до 75%) и уменьшением до 5 % теплового потока в заготовку, перечисленные факторы создают условия для снижения температуры обрабатываемой поверхности детали и повышения качества механической обработки до уровня шлифования при общем росте производительности в 1,5-3 раза.

Для качественной реализации техпроцесса ВСО необходимо обеспечить:

1. Высокие частоты вращения ($n = 15\ 000 \dots 150\ 000$ об/мин), обеспечивающие высокие скорости резания – до 200 м/с.
2. Микрометрическую жёсткость мест установки инструмента – до 1000 Н/мкм, а при обработке малоразмерных деталей – не менее 10...80 Н/мкм, чтобы при этом уход инструмента от сил резания не превышал 0,3 мкм.
3. Точность позиционирования ротора до 1...2 мкм.
4. Вращающий момент и несущую способность, значительно превышающие моменты и силы, возникающие при механической обработке.
5. Динамическую устойчивость при переходных режимах, разгоне и прохождении критических частот. Разнесение собственных частот с частотами возмущающих сил и колебаний в системе «инструмент – заготовка».
6. Максимальную регулируемость оборудования – по частоте вращения, собственным частотам, жёсткости, несущей способности – для точной подстройки под условия (параметры) высокоскоростной механообработки [2].

В ЛГУ им. В. Даля разработан и изготовлен экспериментальный образец высокоскоростного пневмошпинделя новой конструкции – на регулируемых конических аэростатических опорах, который отвечает всем вышеперечисленным условиям качественной реализации ВСО. Аэростатические опоры конической формы позволяют создать опорную систему шпинделя только на двух подшипниках вместо четырёх, и, самое важное, впервые сделать опорную систему регулируемой и настраиваемой в процессе эксплуатации. Изменением величины зазора с воздушной смазкой в широких диапазонах регулируются основные характеристики шпинделя – жёсткость, несущая способность, собственные частоты колебаний, максимальная рабочая частота вращения [2, 3, 4]. Это даёт возможность точно настраивать пневмошпиндель под требования технологического процесса высокоскоростной механической обработки.

Для исследования характеристик пневмошпинделя, диапазонов их регулирования и эффективности его модернизации были разработаны методики, алгоритмы и применялись: экспериментальные натурные исследования; аналитический метод расчёта характеристик на основе математической модели; вычислительные компьютерные эксперименты в среде программ инженерного анализа методом конечных элементов (МКЭ). Все методы показали хорошую сходимость между собой при исследованиях статических и динамических характеристик, а также эффективность предложенной конструкции высокоскоростного пневмошпинделя и модернизации его опоры. Данная работа посвящена исследованию характеристик пневмошпинделя постановкой компьютерных вычислительных экспериментов в среде САПР (CAD/CAE) на основе его 3D-модели.

2. Постановка задачи

Разработка шпинделей для механической и, особенно, высокоскоростной механической обработки ориентирована на достижение необходимого уровня их выходных

параметров и интегральных характеристик – жёсткости, несущей способности, диапазона реализуемых частот вращения, собственных частот колебаний, амплитуд вынужденных колебаний ротора и точности его позиционирования с инструментом. Компьютерные вычислительные эксперименты разделены на два блока: исследование статических интегральных характеристик (несущая способность, жёсткость, расход технологического воздуха); исследование динамических характеристик (собственные частоты вращения, амплитуды вынужденных колебаний, отклики на вводимый дисбаланс). При этом, точность позиционирования и диапазон реализуемых частот вращения определяется сочетанием статических и динамических характеристик в заданных условиях эксплуатации пневмошпинделя.

Целью работы является исследование статических и динамических характеристик пневмошпинделя, диапазонов их регулирования постановкой серий вычислительных компьютерных экспериментов в программах инженерного анализа САПР.

Объектом исследований является пневмошпиндель на двух различных по конструкции и размерам конических аэростатических опорах, предназначенный для высокоскоростной механической обработки металлов и монокристаллов (рис. 1.).

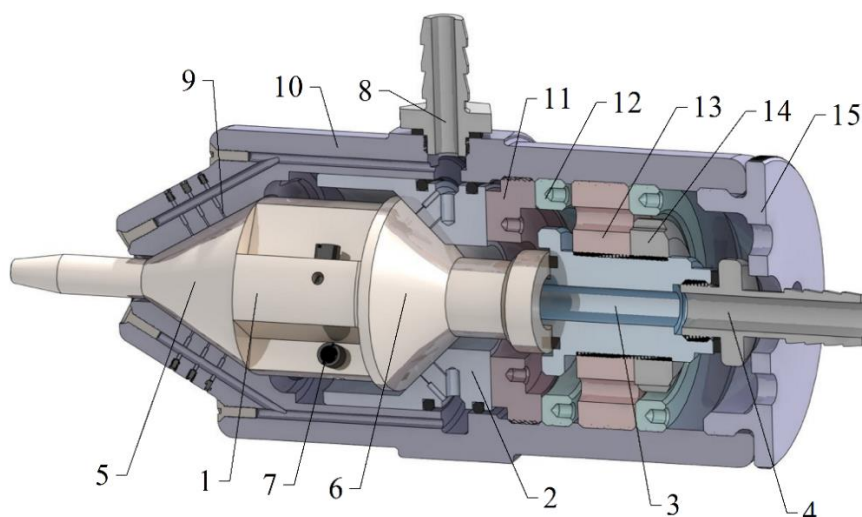


Рис. 1. Модель пневмошпинделя в разрезе: 1 – ротор с турбиной; 2 – подшипник; 3 – втулка; 4, 8 – штуцера для подачи воздуха; 5, 6 – радиально-упорные конические аэростатические опоры (левая и правая соответственно); 7 – сопла Лавали газовой турбины; 9 – ограничители расхода воздуха (питатели); 10 – корпус; 11, 12 – прижимное и стопорное кольца; 13, 14 – регулировочная и стопорная гайки; 15 – крышка

3. Последовательность и содержание вычислительных экспериментов по исследованию характеристик регулируемого пневмошпинделя на конических аэростатических опорах

На первом этапе исследовались статические характеристики пневмошпинделя. Компьютерные вычислительные эксперименты выполняются на основе трёхмерной модели в программах CAD/CAE и CFD, таких как FlowVision, FloWorks методом конечных элементов. Необходимо отметить, что выверенного и надёжного алгоритма расчёта конических аэростатических опор не существовало. В процессе его разработки была создана точная 3D-модель пневмошпинделя с полной детализацией конструкции конических опор (см. рис.1.), в ходе априорного анализа получено максимально досто-

верное представление о происходящих газодинамических процессах течения воздушной смазки в зазоре и приближённо определены ожидаемые результаты вычислений [4, 5]. Затем было выполнено планирование вычислительных экспериментов (по аналогии с натурными экспериментами), так как они являются многофакторными и, с учётом варьирования настроек программы газодинамического анализа, полный массив вариантов вычислений составляет свыше пяти миллионов.

Для оценки достоверности исследований были получены аналогичные результаты аналитическим методом и в ходе натурных экспериментальных исследований пневмошпинделя в лабораторных условиях.

Были определены следующие основные требования к вычислительной процедуре и результатам компьютерных вычислительных экспериментов при численном определении интегральных характеристик шпинделя и его аэростатических опор:

- уровень достоверности количественной информации – не менее 85 % (погрешность в сравнении с другими методами получения количественной информации не должна превышать 15 %);
- уровень чувствительности расчётной модели по давлению подачи воздушной смазки – не ниже 0,05 атм.;
- уровень чувствительности по эксцентриситету e не ниже 2 мкм;
- параметрическая повторяемость в серии одинаковых вычислений не менее 98 %.

Вычислительные эксперименты выполнялись для каждой из опор и всего пневмошпинделя, как при отсутствии нагрузки (эксцентриситет $e = 0$ мкм), так и при варьировании радиальной и осевой нагрузок ($e \neq 0$ мкм) и давления подачи воздушной смазки.

Увеличение нагрузки на опору осуществлялось за счёт ступенчатого изменения эксцентриситета e ротора с малым шагом ($\Delta e = 2 \dots 5$ мкм) в радиальном или осевом направлениях. Конструктивно точная 3D-модель пневмошпинделя определила проточную часть (питатели и зазор) для воздушной смазки, которые составляют расчётную область – сетку. Установлены термодинамические параметры газовой смазки (вязкость, температура, скорость или давление) на входе и давление на выходе из расчётной области. Параметры расчётной сетки определены пробными вычислениями. Установлено, что наиболее рациональной, с точки зрения использования ресурсов вычислительной машины и получаемой точности результатов расчёта, является установка точности сетки на уровне 80 %. На рис. 2. показана сгенерированная в программе CFD сетка расчётного объёма всей опорной системы пневмошпинделя с общим количеством элементов 69294.

Определены начальные и граничные условия вычислительных экспериментов:

- среда – воздушная смазка;
- температура воздушной смазки – +20 °С;
- давление на входе в ограничители расхода (питатели) опор – 401325 ... 601325 Па;
- давление на выходе из зазоров конических опор – 101325 Па;
- интенсивность турбулентности – 2 % (поток воздушной смазки в целом считается ламинарным, что и является расчётным случаем, а области турбулентности носят локальный характер);
- поверхностям конических опор внутри зазоров присвоена шероховатость в 0,6 мкм.

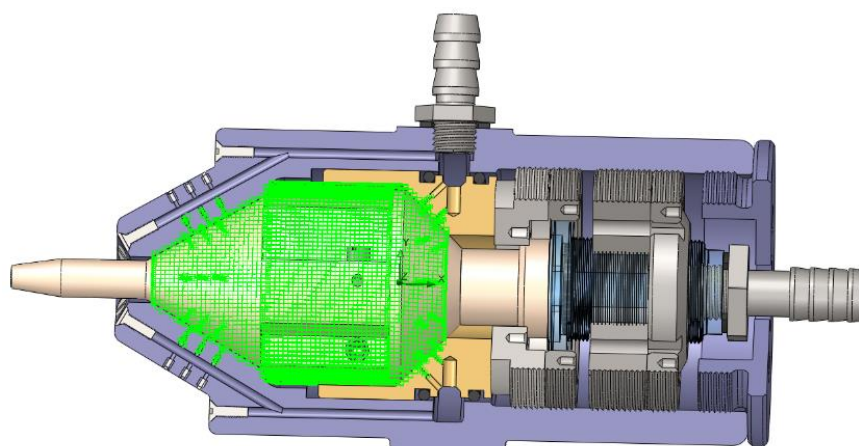


Рисунок 2. 3D-модель пневмошпинделя в разрезе с расчётной сеткой

Вычислительные эксперименты для каждого значения факторов (при неизменных условиях и настройках программы CFD), выполнялись многократно. Затем полученная выборка результатов данной интегральной характеристики проходила статистическую обработку, а среднее арифметическое полученной выборки результатов принималось за действительное расчётное значение для данных граничных и начальных условий. При построении графических зависимостей интегральных характеристик от варьируемых параметров каждое действительное расчётное значение становилось точкой-маркёром. По полученным точкам строились кривые функциональных зависимостей.

На рис. 3 показаны графики зависимости максимальной (при относительном эксцентриситете $\varepsilon=0,9$) радиальной подъёмной силы W_{eky} для правой опоры пневмошпинделя в исходном (ИО) и модернизированном (МО) вариантах её конструкции от величины среднего зазора C при варьировании давления подачи воздушной смазки p_s .

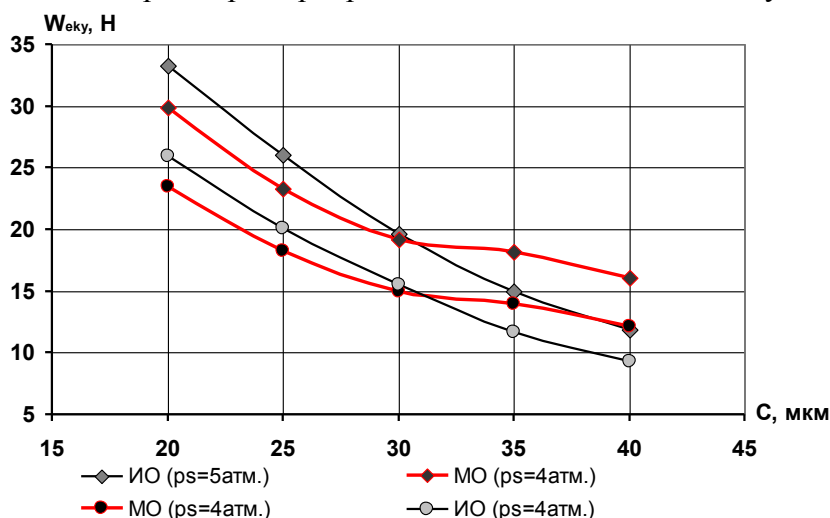


Рисунок 3. Зависимость радиальной подъёмной силы W_{eky} правой опоры от величины зазора C при варьировании давления подачи воздушной смазки p_s

Модернизация правой опоры заключалась в раззенковке её питателей и создании внутри зазора колец лабиринтного уплотнения, что привело к повышению жёсткости и несущей способности не только правой опоры, но и левой, а также всего пневмошпин-

деля [5]

Приведенные на рис. 3. зависимости показывают не только функциональную связь между максимальной подъёмной силой (несущей способностью) W_{eky} и величиной зазора C , но и диапазон регулирования W_{eky} в пневмошпинделе, так как расчётные значения C соответствуют действительному диапазону их регулирования на экспериментальном образце. Видно, что влияние установленных прямоточных лабиринтов на радиальную несущую способность проявляется при средних рабочих зазорах правой опоры, т.е. свыше 30 мкм [5].

Результаты компьютерных расчётов осевой K_{ZKP}^e и радиальной K_{XKP}^e жёсткостей правой конической азростатической опоры при варьировании величины среднего зазора C для давлений подачи технологического воздуха 4 атм. и 5 атм. показаны на рис. 4.

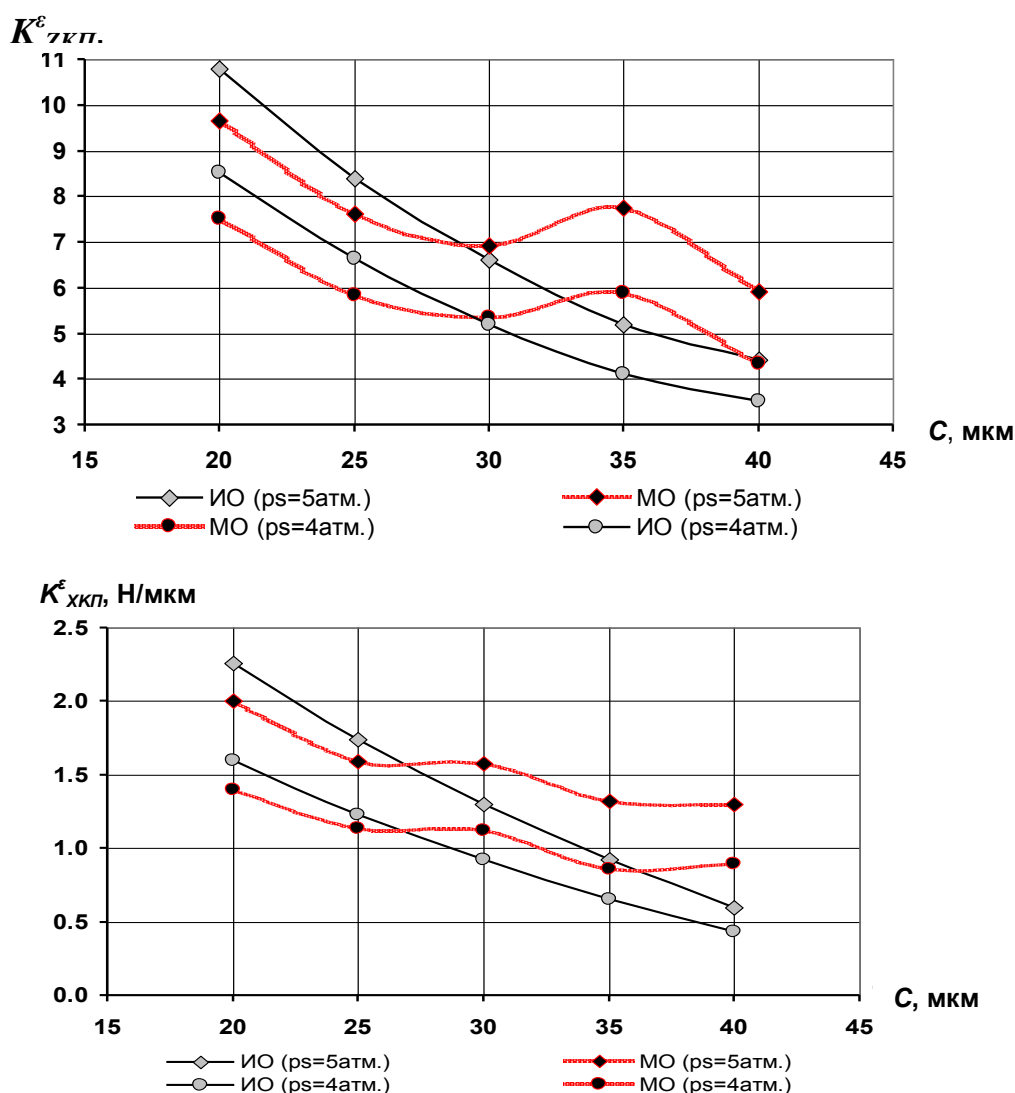


Рисунок 4. Осевая (а) и радиальная (б) жёсткости правой опоры в зависимости от зазора

Полученные в вычислительном эксперименте зависимости для осевой K_{ZKP}^e и радиальной K_{XKP}^e жёсткостей показали:

- уменьшение градиента жёсткости у модернизированной правой опоры от величины среднего зазора C с воздушной смазкой;
- расчётную регулируемость по осевой $K_{ЗКП}^c$ и радиальной $K_{ХКП}^c$ жёсткостям правой опоры на уровне 45-50 % от средних значений при изменении её среднего зазора C .

Для левой опоры пневмошпинделя были получены аналогичные зависимости с учётом увеличения значений её несущей способности и жёсткости в 1,5-2 раза. При этом в ходе вычислительных экспериментов в каждом расчётном случае определялся расход технологического воздуха через опоры как интегральная характеристика, показывающая эксплуатационные затраты и эффективность принимаемых технических решений [4, 5].

Наряду с вышесказанным, компьютерный вычислительный эксперимент позволил получить общую картину распределения газодинамических параметров в зазоре конических аэростатических опор, направления потоков воздушной смазки. Особенно важно детально проанализировать поле давлений в «смазочном конусе», получить расчётную информацию в любой точке зазора, несмотря на то, что его толщина составляет от 2 до 80 мкм в различных секторах при эксцентриситетах, вызванных внешними нагрузками.

На рис. 5 показаны принцип действия опорной системы пневмошпинделя, нагрузки, ротор экспериментального образца и результаты вычислительного эксперимента в виде «смазочных конусов», показывающих поле давлений воздушной смазки в правой и левой аэростатических опорах при действии радиальной нагрузки.

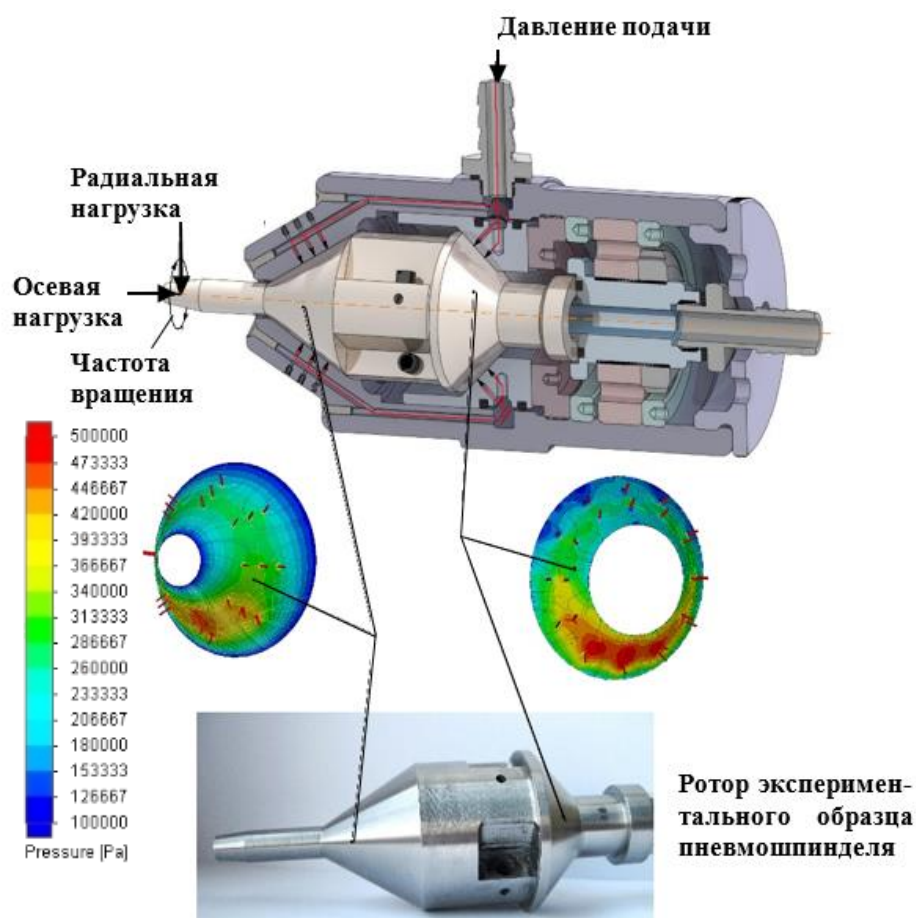


Рисунок 5. Модель, нагрузки, результаты расчёта и ротор пневмошпинделя

Расчёты показали, что если до модернизации правой опоры радиальная несущая способность пневмошпинделя составляла 60 Н, то после – 71 Н (+ 18.5 %). При этом, за счёт перераспределения величин зазоров, расход технологического воздуха правой модернизированной опоры увеличился с 2,02 м³/ч до 2,70 м³/ч, а левой – уменьшился с 3,5 м³/ч до 1,8 м³/ч, расход воздуха всего пневмошпинделя сократился на 1,02 м³/ч (на 38 %).

На следующем этапе вычислительными экспериментами были исследованы динамические характеристики пневмошпинделя. Расчётная модель вычислительных экспериментов построена на основе твердотельной модели пневмошпинделя, в которой воздушная смазка заменена пружинами с близкими к ней упругими (в соответствии с рассчитанными ранее жёсткостями конических аэростатических опор) и демпфирующими свойствами. Компьютерные расчёты выполнялись с использованием уравнений роторной динамики, которые в матричной форме имеют вид [6]:

$$[M][\ddot{U}] + ([b] + [G])[\dot{U}] + ([K] + [B])[U] = [F],$$

где M , b и K – соответственно матрицы масс, демпфирования и жёсткости системы конечных элементов;

U – вектор-столбец узловых перемещений;

F – вектор-столбец динамической нагрузки, приведенной к узлам конечно-элементной сетки;

G , B – гироскопическая матрица и матрица демпфирования.

На рис. 6. приведена частотная диаграмма (диаграмма Кэмпбелла) для пневмошпинделя после модернизации его правой опоры с указанием критических (резонансных) частот вращения, которые не должны совпадать с частотами рабочих режимов функционирования пневмошпинделя при механической обработке.

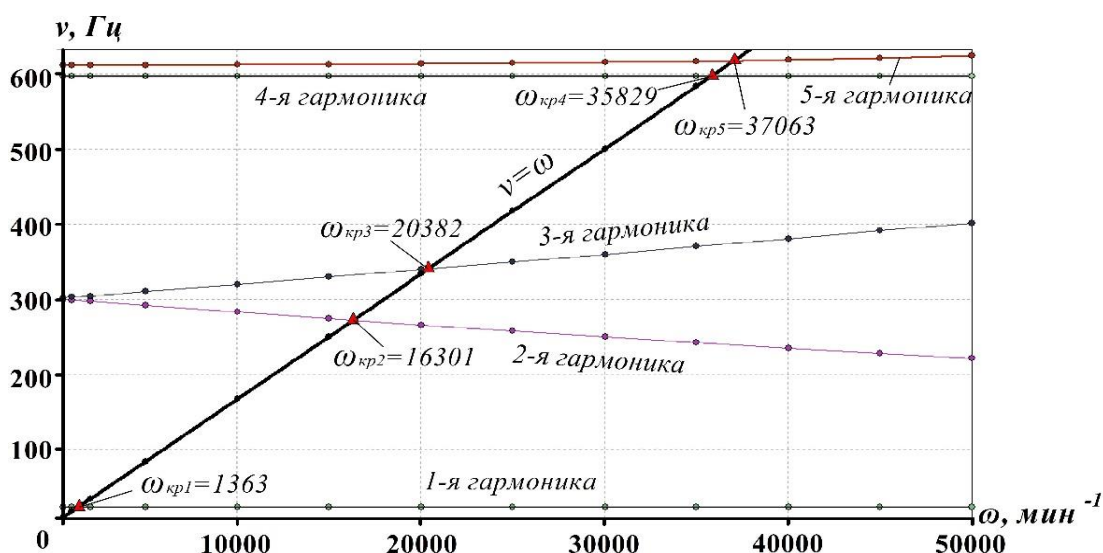


Рисунок 6. Диаграмма Кэмпбелла

На рис. 7. показаны результаты вычислительного эксперимента по определению отклика (по амплитуде колебаний) на искусственно введенный дисбаланс ротора при разгоне и выходе на установившемся режиме вращения [5, 7, 8].

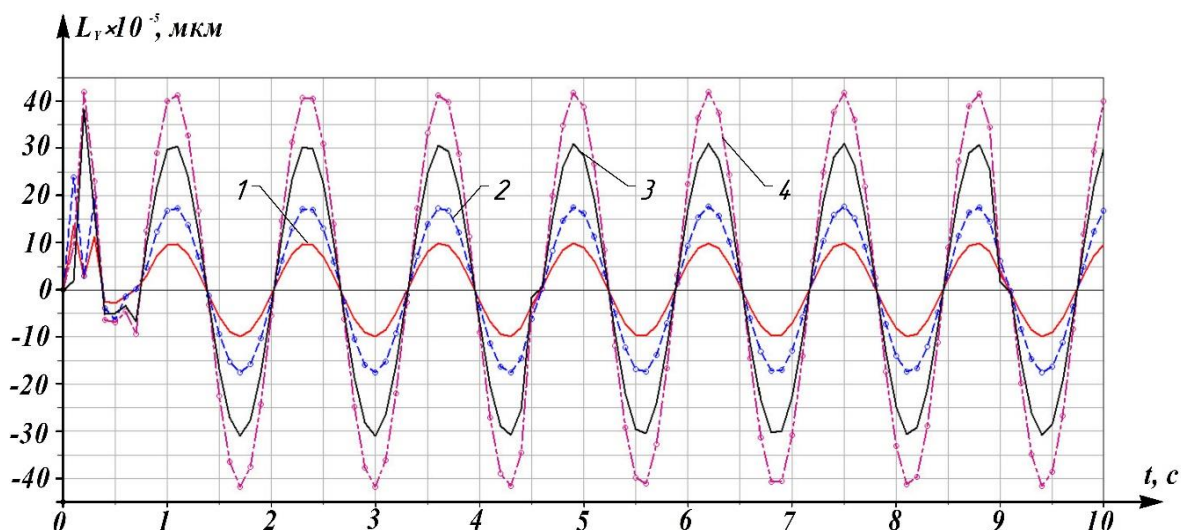


Рисунок 7. Отклик на дисбаланс: 1, 3 – колебания левой опоры и концевой части ротора после модернизации правой опоры; 2, 4 – колебания левой опоры и концевой части ротора до модернизации

На рис. 8. показана оценка устойчивости ротора при вращении под технологической нагрузкой и без неё. Она оценивалась по радиусу орбитального движения центров масс конусов левой и правой опор ротора после модернизации правой опоры.

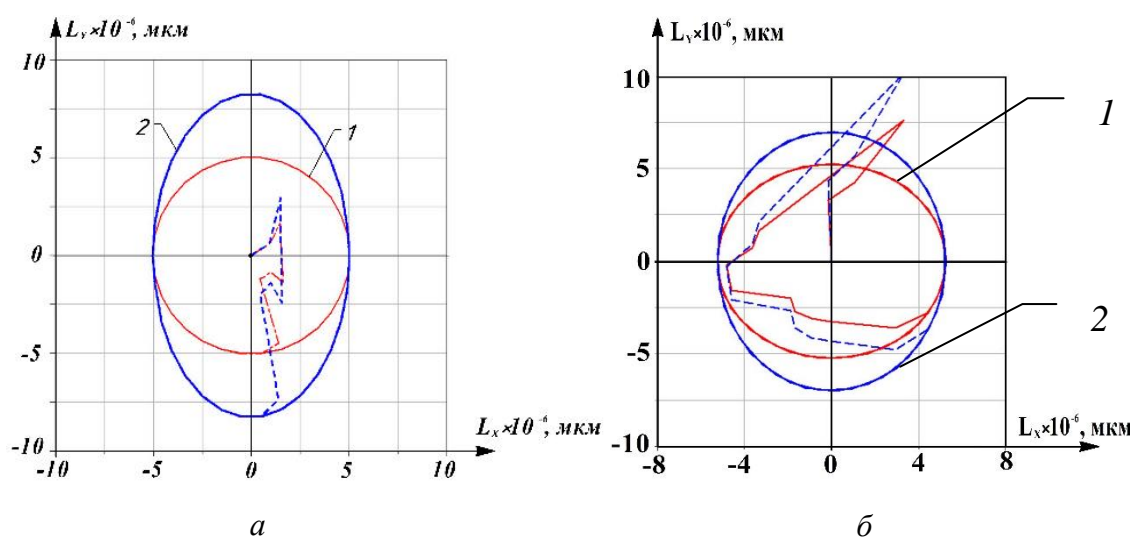


Рисунок 8. Траектории центров масс левой (а) и правой (б) аэростатических опор после усиления правой опоры пневмошпинделя: 1 – колебания опор без нагрузки ($\varepsilon = 0$); 2 – колебания опор под максимальной нагрузкой с относительным эксцентриситетом в опоре $\varepsilon = 0,8$

Модернизация правой конической аэростатической опоры раззенковкой питателей и создание внутри зазора бесконтактного лабиринтного уплотнения привели к существенному (более чем в 2 раза) уменьшению радиусов или амплитуд орбитального движения опор при вращении ротора [5, 7].

4. Выводы

Выполненные вычислительные компьютерные эксперименты позволили впервые исследовать средствами САПР статические и динамические интегральные характеристики пневмошпинделя на конических аэростатических опорах. Вычисления проведены при различных настройках регулируемого пневмошпинделя и варьировании нагрузок. Были исследованы несущая способность, жёсткость, расход технологического воздуха, собственные частоты колебаний, амплитуды вынужденных колебаний, отклики на вводимый дисбаланс. При этом исследовались как отдельные опоры пневмошпинделя – правая и левая – так и весь пневмошпиндель. Разработанная методика вычислительных экспериментов позволила получить результаты с уровнем сходимости с результатами аналитических расчётов и натуральных экспериментальных исследований не менее 88 %.

Вычислительными экспериментами была подтверждена эффективность регулирования интегральных характеристик пневмошпинделя через изменение величины среднего зазора в его опорах. Также была показана эффективность модернизации правой аэростатической опоры, которая привела к повышению жёсткости и несущей способности пневмошпинделя, снижению расхода технологического воздуха, повышению его динамической устойчивости – снижению амплитуд колебаний и орбитальных движений конических опор ротора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Преимущества и недостатки высокоскоростной обработки: [сайт StankoffRu]. – М, 2023 – URL: <https://www.stankoff.ru/blog/post/981> (дата обращения: 14.06.2023).
2. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования оборудования бесконтактного типа с регулируемыми характеристиками для высокоскоростной механической обработки: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Брешев В. Е. – Луганск, 2021. – 42 с.
3. Рябичев, В. Д. Основы расчёта энергосберегающих опор с газовой смазкой для оборудования механической обработки / В. Д. Рябичев, В. Е. Брешев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – 2020. – № 1(30). – С. 10–19.
4. Пинегин, С. В. Статические и динамические характеристики газостатических опор / Пинегин С. В., Табачников Ю. Б., Сипенков И. Е. – М.: Наука, 1982. – 265 с.
5. Брешев, В. Е. Приводы машин на регулируемых конических аэростатических опорах: Монография / В. Е. Брешев, А. В. Брешев. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета им. В. Даля, 2016. – 204 с.
6. Nelson, H.D. The dynamics of rotor bearing systems using finite elements / H.D. Nelson, J.M. McVaugh // Journal of Engineering for Industry. – 1976. –Vol. 98. – P. 593–600.
7. Брешев, В. Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: Монография / В. Е. Брешев. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета им. В. Даля, 2016. – 208 с.
8. Czolczynski, K. Rotordynamics of gas-lubricated journal bearing system / Krzysztof Czolczynski. – New York: Mechanical engineering series, Springer Verlag, 1999. – 161p.

Поступила в редколлегию 19.03.2023 г.

И. А. Горобец, канд. техн. наук, доц., **Д. О. Киселица**, магистрант,
Д. С. Жарких, магистрант
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР РФ
E-mail:igor.gorobets2022@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ 3D-ПРИНТЕРА ПОВЫШЕННОГО ОБЪЕМА ПЕЧАТИ

Предложена структурная и кинематическая схемы 3D-принтера с дополнительными избыточными степенями свободы рабочего органа. Синтезирована 3D-модель модернизированного принтера. Исследованы параметры объема печати принтера до и после модернизации. Доказано увеличение на 136% объема печати на модернизированной конструкции принтера. Исследованы динамические характеристики модернизированного устройства. Приведен анализ динамических характеристик конструкции принтера. Предложенные схемы и разработанная конструкция устройства повысит эффективность эксплуатации 3D-принтеров.

Ключевые слова: объем, печать, принтер, структура, компоновка, динамика, эффективность.

I. Gorobets, D. Kiselitsa, D. Zharkikh

RESEARCH AND DESIGN OF 3D PRINTER STRUCTURE OF INCREASED PRINTING VOLUME

A structural and kinematic scheme of a 3D printer with additional excess degrees of freedom of the working body is proposed. Synthesized 3D model of the upgraded printer. The values of the printer print volume before and after the upgrade have been studied. Proven 136% increase in print volume with a redesigned printer design. The dynamic characteristics of the upgraded device are investigated. An analysis of the dynamic characteristics of the printer design is given. The proposed schemes and the developed device design will increase the efficiency of 3D printer operation.

Keywords: volume, printing, printer, structure, layout, dynamics, efficiency

1. Введение

Дальнейшее совершенствование промышленного производства изделий машиностроения привело к появлению и реализации аддитивных технологий (от англ. Additive Fabrication), суть которых состоит в послойном увеличении размеров объекта производства, вплоть до получения окончательных габаритов и необходимого качества поверхности изделия [1,2,3]. В настоящее время существует много разновидностей аддитивных технологий, к которым можно отнести: SLM (Selective Laser Melting – селективное лазерное плавление металлического порошка), SLA (Laser Stereolithography – послойное затвердевание жидкого материала под воздействием лазера), SLS (Selective Laser Sintering – послойное лазерное спекание порошковых материалов), FDM (Fused Deposition Modeling – послойное наплавление пластиковой нити), LCD (Liquid Crystal Display – послойная фотополимерная печать с засветкой светодиодной ультрафиолетовой матрицей) и другие [1,2,3].

Перечисленные технологии обладают рядом достоинств и недостатков. К недостаткам можно отнести недостаточную прочность и качество (точность, шероховатость, твердость) поверхностного слоя металлических изделий, в сравнении с классическими технологиями (subtractive manufacturing technologies, т.е. технологии вычитания материала, когда методами резания получают деталь, размеры которой меньше размеров заготовки) получения изделия машиностроения. Среди важных достоинств аддитивных технологий, дающих преимущество в сравнении с классическими, является низкая себестоимость производства изделия, минимальная производственная площадь и техниче-

ский персонал, невысокая стоимость технологического оборудования. Особенностью аддитивных технологий является их исключительная работа с предварительно спроектированной в САПР 3D-моделью изделия.

Интерес представляет наиболее применяемая в настоящее время FDM-технология печати изделия из нити – гибкого филамента. В качестве материала печати используются нити, обладающие самыми различными механическими характеристиками (ударопрочность, износостойкость, термоустойчивость, ударная вязкость, гибкость, прочность, стойкость на растяжение и изгиб, долговечность): PLA, ABS, PETG, TPU, нейлон, PC и др. [1,2,3,4].

Конструктивные варианты исполнения устройств 3D-печати можно свести к нескольким типам, реализующим картезианский или полярный принцип печати (в зависимости от движения экструдера) и принцип, использующий параллельные структуры (Delta – принтер), рис. 1. Однако, по нашим исследованиям, недостатком известных конструкций является ограниченный объём печати в сравнении с объёмом технологического устройства. Это связано с тем, что объём фигуры, вписанной в пространство между стойками принтера, достигаемый рабочим органом, всегда меньше объёма фигуры, заключённой по сторонам стоек устройства. Причём, такое уменьшение рабочего объёма в принтере может достигать величины 40%.



Рисунок 1. Вид 3D-принтеров, реализующих работу в декартовой, полярной системах координат и на основе параллельных структур, соответственно

В связи с перечисленными конструктивными и эксплуатационными особенностями устройств реализации аддитивных технологий, актуальным является вопрос увеличения объёма производимого изделия машиностроения на 3D-принтерах FDM-технологий.

Целью исследований является повышение объёма 3D-печати, путём синтеза структурной схемы принтера с избыточной степенью свободы рабочего органа.

2. Основное содержание и результаты

В качестве объекта моделирования использовался 3D-принтер параллельной структуры, обладающий рядом преимуществ по скорости и точности печати [5,6]. Для синтеза конструкции принтера использовались исследования авторов по анализу из-

вестных структур конструкции устройства [7], на основе чего была принята структурная схема в виде Триглайда. Для выполнения поставленной цели авторами было предложено дополнить конструкцию устройства 3D-печати избыточной степенью свободы рабочего органа путём введения дополнительного звена в виде диска 8 с рабочим органом 9, установленного на подвижной платформе 4 с возможностью поворота относительно вертикальной оси платформы, рис. 2. Причём, рабочий орган 9 принтера располагается на поворотном диске 8 с эксцентриситетом относительно вертикальной оси платформы 4, рис. 2. Такое расположение рабочего органа 9 и дополнительная степень подвижности в виде поворота диска 8 относительно вертикальной оси подвижной платформы 4 позволит увеличить максимальный объём печати 3D-принтера.

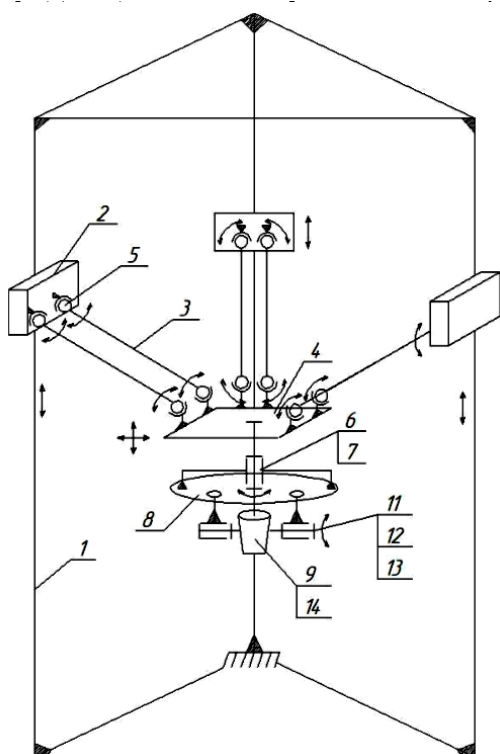


Рисунок 2. Структурная схема принтера с улучшенными параметрами объёма печати

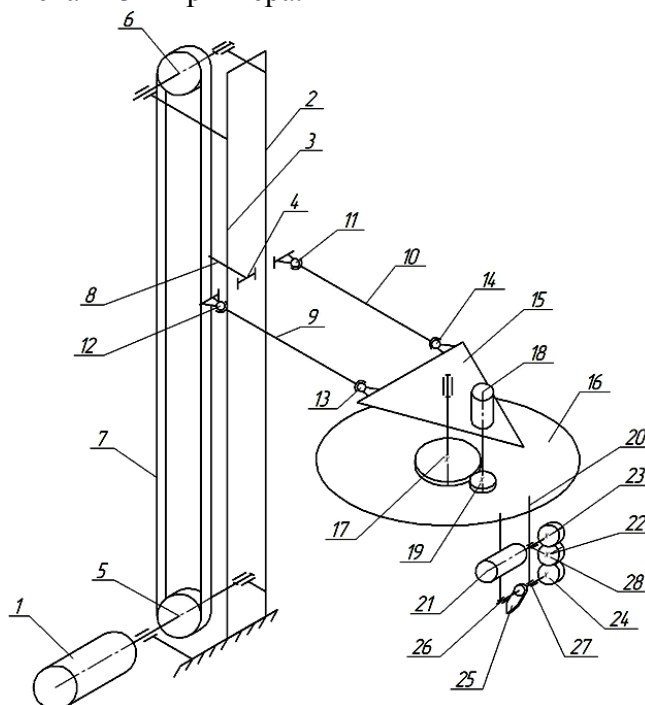


Рисунок 3. Фрагмент кинематической схемы принтера

Для проведения дальнейших исследований была разработана кинематическая схема принтера, рис. 3, состоящая из электродвигателя 1, вертикальных направляющих 2 и 3, каретки 4, шкивов 5 и 6, ремня 7, элемента соединения 8 с кареткой 4, штанг 9 и 10 с шаровыми опорами 11-14, подвижной платформы 15, поворотного диска 16, зубчатого колеса 17, электродвигателя 18 с шестерней 19, п-образной рамы 20, электродвигателя 21, шестерни 22, зубчатых колёс 23 и 24, экструдера 25, опор 26 и 27 экструдера, вала 28.

При проведении теоретических исследований в качестве исходных данных использовались следующие положения:

- Конструкция принтера состоит из трёх идентичных вертикальных направляющих, жёстко закреплённых к основанию. По направляющим перемещаются ползуны, попарно связанные штангами с платформой.

- Ползуны перемещаются по направляющим без трения.
- Вертикальные направляющие принтера образуют равносторонний треугольник. Расстояние между любыми вертикальными направляющими равно 695 мм.
- Штанги закреплены к ползуну и платформе с возможностью поворота. Поворот штанг относительно ползуна и платформы осуществляется без трения.
- Все три пары штанг имеют одинаковую длину, равную 480 мм.

Реализация синтеза и последующего 3D-моделирования работы устройства потребовало проведение выбора материала и габаритов деталей, расчётов прочности основных узлов принтера, которые были проведены в САЕ приложении FEM SolidWorks, рис. 4.

В качестве движителя элементов принтера был принят электрический привод в виде шаговых двигателей. Для выбора механических характеристик электрических двигателей привода была разработана расчётная схема, рис. 5 и определены параметры крутящего момента и мощности электродвигателей

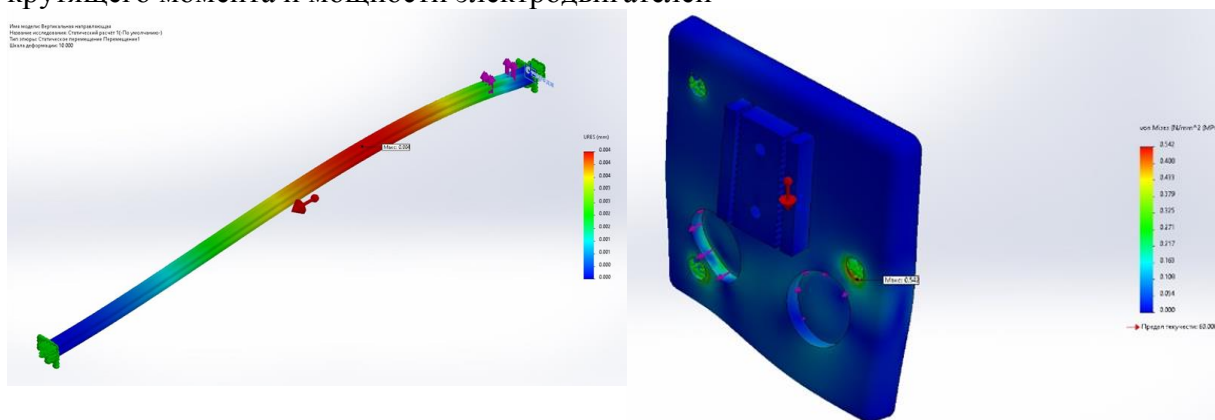


Рисунок 4. Результаты моделирования упруго-напряженного состояния элементов принтера

По результатам расчёта механических характеристик в качестве привода движущихся кареток 3D-принтера приняты шаговые двигатели модели Nema 17 17HS3430, рис.6.

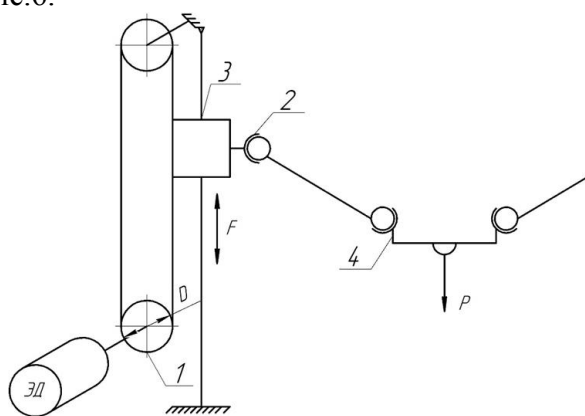


Рисунок 5. Расчётная схема для определения параметров привода принтера
1 – шкив; 2 – штанга с опорой; 3 – каретка;
4 – подвижная платформа.

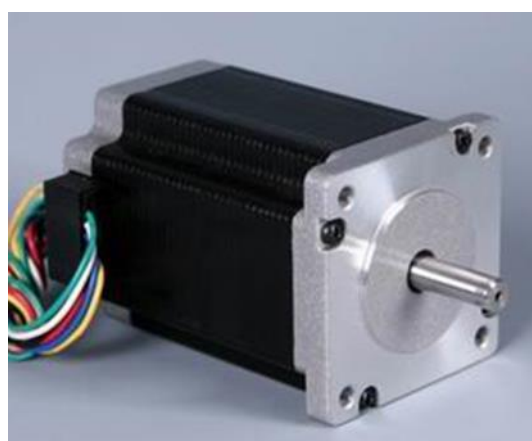


Рисунок 6. Вид шагового электрического двигателя модели Nema 17

В результате выбора геометрических параметров деталей и узлов принтера построена 3D-модель, позволяющая провести теоретические исследования и определить максимальный объем печати изделий на устройстве до и после его модернизации путём добавления избыточной степени свободы рабочего органа. Анализ результатов объёмных графических исследований 3D-печати принтеров, рис. 7, даёт основание утверждать, что добавление избыточной степени свободы рабочего органа для принятых исходных данных, позволит увеличить объем печати на 136% (с $0,0452 \text{ м}^3$ до $0,107 \text{ м}^3$).

Внесение дополнительных конструктивных изменений для реализации избыточной степени свободы рабочего органа безусловно отразится и на динамических характеристиках 3D-принтера. Для изучения такого влияния были проведены теоретические исследования динамических характеристик механической конструкции устройства в модуле АРМ FEM CAD системы КОМПАС-3D, рис. 8. По результатам моделирования определены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) конструкции принтера, рис. 9 и гармоника частот собственных колебаний изделия. Исходя из графика АЧХ (см. рис. 9) следует, что наибольшие амплитуды колебаний наблюдаются у низкочастотных гармоник (частота колебаний порядка 10,9 Гц), однако, присутствует и высокочастотная гармоника с частотой, равной 178,3 Гц.

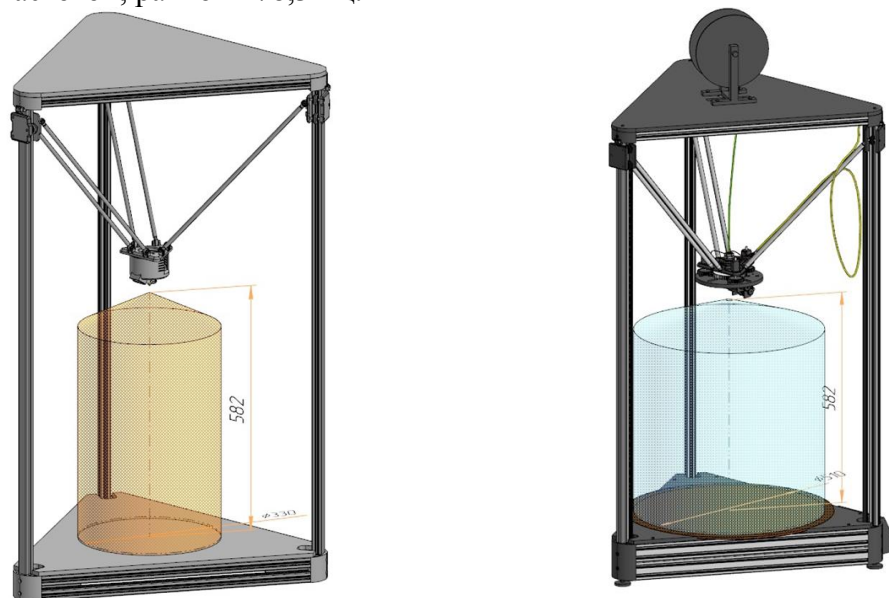


Рисунок 7. 3D-модель рабочей зоны принтера до и после модернизации, соответственно

Результаты моделирования динамических параметров механической системы модернизированной конструкции принтера позволят учесть при программировании работы рабочего органа принтера параметры скорости, ускорений и подачи филамента, которые бы исключали возможное вхождение устройства в предрезонансную фазу работы, вызывающую многократное увеличение амплитуды колебаний рабочего органа принтера.

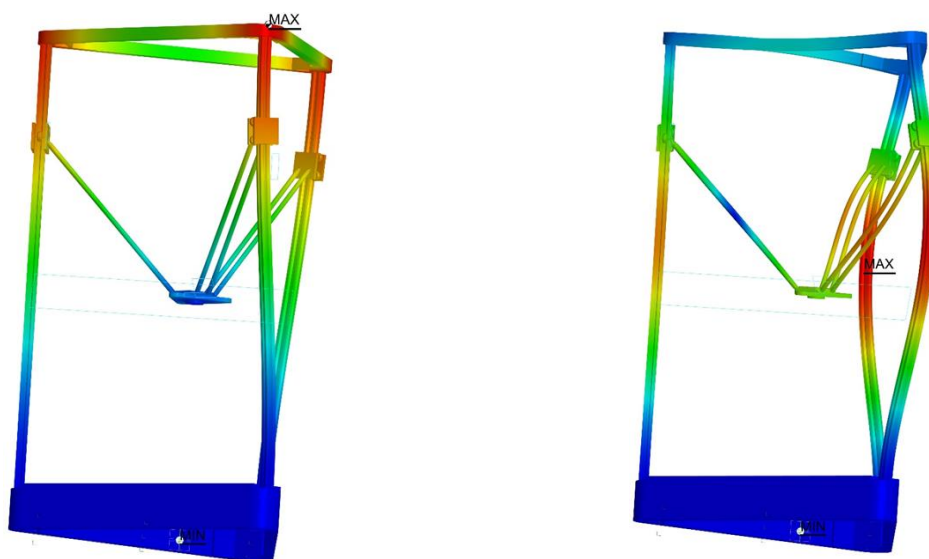


Рисунок 8. Результаты моделирования динамических параметров принтера

3. Заключение

Разработана структурная и кинематическая схемы 3D-принтера с дополнительными избыточными степенями свободы рабочего органа. Рассчитаны геометрические параметры деталей и узлов, синтезирована 3D-модель модернизированного принтера. Исследованы параметры объёма печати принтера до и после модернизации, путём добавления избыточной степени свободы рабочего органа. Доказано увеличение на 136% объёма печати на модернизированной конструкции принтера по сравнению с базовой конструкцией.



Рисунок 9. Амплитудно-частотная характеристика конструкции 3D-принтера

Исследованы динамические характеристики модернизированного устройства. Анализ динамических характеристик разработанной конструкции принтера показал наличие низкочастотных (10,8 Гц) и высокочастотных (178,3 Гц) гармоник спектра частот соб-

ственных колебаний устройства, с преимуществом (более 2,4 раз) амплитуды по низкой частоте.

Предложенные структурная, кинематическая схемы и разработанная конструкция устройства могут использоваться на стадии проектирования новых и модернизации существующих конструкций промышленных 3D-принтеров, что повысит объем печати и эффективность эксплуатации устройств реализации аддитивных технологий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с..

2. Louvis, E. Selective laser melting of aluminum components [Текст] / E. Louvis, P. Fox, C.J. Sutcliffe // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – Vol. 211. – p. 275-284.

3. Ding, D. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests [Текст] / D. Ding [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2015. – Vol. 81. – p. 465-481.

4. Горобец, И. А. Обзор исследований прочности изделий полученных с использованием fdm - технологий / И. А. Горобец, Н. В. Голубов, Д. А. Пикалов /Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 81-85.

5. Kong, X. Type Synthesis of Parallel Mechanisms / X. Kong, C. Gosselin. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. – 272 p.

6. Хейло, С. В. Манипуляционные механизмы параллельной структуры. Структурный синтез. Кинематический и силовой анализ: монография / С. В. Хейло, В. А. Глазунов, С. В. Палочкин – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2011. – 153с.

7. Горобец, И. А. Исследование структурных схем конструкций 3D-принтера / И.А. Горобец, А. М. Лахин, Д. О. Киселица, Д. С. Жарких / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2022 г. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – С. 80-83.

Поступила в редколлегию 12.03.2023 г

УДК 041.514.8.06-533.4

И. Н. Заплетников, д-р техн. наук, проф., **И. С. Севаторова**, канд. техн. наук,
А. В. Гордиенко, канд. техн. наук, доц.
ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила
Туган-Барановского», г. Донецк, ДНР
Тел. +7 949 451-46-71, E-mail: oborud@kaf.donnuet.ru

КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗБИВАЛЬНЫХ МАШИН НА ПОКАЗАТЕЛИ ИХ КАЧЕСТВА

В работе использованы технические характеристики (ТХ) взбивальных машин пищевых производств, используемые при оценке качества этих машин, оценке их технического уровня, в рекламе данного оборудования и маркетинговых процессах. В ТХ машин отсутствуют сведения о соответствии машин санитарно-гигиеническим требованиям, в том числе, уровню излучаемого шума. Целью работы является оценка влияния показателей качества на учет шумовой характеристики (ШХ) оборудования. Для выполнения такой задачи собраны ТХ 22 машин отечественного (РФ) и зарубежного производства. ТХ машин дополнены показателями уровнями звуковой мощности по характеристике А. Определены обобщенные показатели технического уровня без учета и с учетом ШХ машин. Построены диаграммы оценки качества данного оборудования. Установлено, что имеет место существенное расхождение показателей качества в большую и меньшую сторону от 20 до 200%. Поэтому при оценке качества машин и их технического уровня целесообразно учитывать и уровень излучаемого ими шума.

Ключевые слова: показатели качества, взбивальная машина, сравнение, уровень шума.

I. N. Zapletnikov, I. S. Sevatorova, A. V. Gordienko

QUALIMETRIC ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF NOISE CHARACTERISTICS OF WHIPPING MACHINES ON THEIR QUALITY INDICATORS

The paper uses the technical characteristics (TC) of whipping machines of food production, which are used in assessing the quality of these machines, assessing their technical level, in advertising this equipment and marketing processes. In the TC of the machines there is no information about the compliance of the machines with sanitary and hygienic requirements, including the level of emitted noise. The purpose of the work is to assess the impact of quality indicators on the consideration of the noise characteristics (NC) of the equipment. To perform such a task, the TC of 22 machines of domestic (Russian Federation) and foreign production are collected. The TC of the machines are supplemented with indicators of sound power levels according to characteristic A. Generalized indicators of the technical level are determined without taking into account and taking into account the NC of the machines. Diagrams for evaluating the quality of this equipment are constructed. As a result, it was found that there is a significant discrepancy in quality indicators up and down from 20 to 200%. Therefore, when assessing the quality of machines and their technical level, it is advisable to take into account the level of noise emitted by them.

Keywords: quality indicators, whipping machine, comparison, noise level.

1. Введение

Технические характеристики (ТХ) оборудования представлены в интернете, технической литературе, рекламных проспектах, нормативно-технической документации и других информационных источниках. Они применяются при оценке качества различного оборудования и маркетинговых процессах, а также при проектировании производственных цехов и участков, оценке их санитарно-гигиенического состояния, в частности, уровня шума.

Среди обязательных характеристик в ТХ оборудования указывается их масса, мощность и габаритные размеры. Что касается уровня излучаемого шума, то его величину производители машин не указывают. А ведь шумовая характеристика оборудова-

ния определяет его технический уровень, безопасность применения и комфортные условия работы обслуживающего персонала.

В оборудовании пищевых производств одними из самых распространённых и «шумных» являются взбивальные машины [1].

Целью данной работы является оценка качества технологического оборудования без учета и с учетом ШХ на примере взбивальных машин пищевых производств.

Для осуществления цели работы собраны ТХ и ШХ 22 образцов взбивальных машин отечественного и зарубежного производства, представленных в таблице 1. Используются известные квалитетические методы исследований.

Таблица 1. Технические характеристики взбивального оборудования

Тип модели	Габариты, мм	Объем дежи, л	Масса, кг	Номинальная мощность, кВт	Звуковая мощность, хх дБА
МПВ-100	1150x830	100	325	2,2	90
МБУ-100	750x1200	100	320	3,6	90
МТИ-100	1350x990	100	800	3,37	90
МПЛ-40	680x993	40	190	1,5	90
Gostrorag B-40-HG	670x660	40	168	1,5	89
Foodatlas B-40BA	640x730	40	150	2	89
Миксер планетарный Arch APL20B	550x650	20	50	0,75	76
Миксер STENO P-80L3VP	960x750	80	310	1,5	84
Миксер STENO PI-40L/VE	1440x960	40	141	1,1	79
Миксер планетарный СРМ 800-CE Hamilton Beach	350x430	8	30	1,5	75
Миксер планетарный ERGO (B-10)	450x370	10	30	0,37	84
Миксер планетарный ERGO (B-20)	770x480	20	60	1,1	87
МВ-40	1000x550	40	200	1,5	89
Sigma BM-10	560x600	10	64	0,37	73
Взбивальная машина МВ-6	400x380	6	35	0,18	88
Взбивальная МВ-35	735x530	35	175	0,75	87
Взбивальная машина МВ-40	1000x550	40	190	1,5	89
Взбивальная машина МВ-60	750x720	60	400	2,2	97
Машина взбивальная BM-10	480x610	10	55	0,55	73,4
Машина PSP-800	390x620	38	65	0,9	78,1
Блендер Masar RP-100	200x200	1,7	4	0,4	73

УКМ	1250x390	10	105	1,15	84
-----	----------	----	-----	------	----

2. Трансформация технических характеристик взбивального оборудования пищевых производств

Для оценки качества применяемого оборудования используются массогабаритный и энергетический показатели, которые учитывают три вида технических параметра машин [2]:

- удельная масса машины $M_y = m/V$, [кг/дм³];
- удельное потребление электроэнергии $N_y = N/V$, [Вт/ дм³];
- удельная занимаемая площадь машины $S_y = F'/V$, [м²/ дм³].

где V – объем дежи, л.

Рассчитанные удельные значения показателей качества взбивального оборудования приведены в таблице 2.

Таблица 2. Удельные значения показателей качества взбивального оборудования без учета ШХ

Тип модели	Удельная занимаемая площадь, м ² /дм ³ • 10 ⁻³ , S_y	Удельная масса, кг/дм ³ , M_y	Удельная мощность, Вт/дм ³ , N_y
МПВ-100	9,55	3,25	0,022
МВУ-100	9,00	3,20	0,04
МТИ-100	13,37	8,00	0,03
МПЛ-40	16,88	4,75	0,04
Gostrorag B-40-HG	11,06	4,20	0,04
Foodatlas B-40BA	11,68	3,75	0,05
Миксер планетарный Arach APL20B	17,88	2,50	0,04
Миксер STENO P-80L3VP	9,00	3,875	0,0188
Миксер STENO PI-40L/VE	34,56	3,53	0,0275
Миксер планетарный CPM 800-CE Hamilton Beach	18,81	3,75	0,19
Миксер планетарный ERGO (B-10)	16,65	3,00	0,04
Миксер планетарный ERGO (B-20)	18,48	3,00	0,06
МВ-40	13,75	5,00	0,04
Sigma BM-10	33,60	6,40	0,04
Взбивальная машина МВ-6	25,33	5,83	0,03
Взбивальная МВ-35	11,13	5,00	0,02
Взбивальная машина МВ-40	13,75	4,75	0,04
Взбивальная машина МВ-60	9,00	6,67	0,04
Машина взбивальная BM-10	29,28	5,50	0,06

Машина PSP-800	6,36	1,71	0,02
Блендер Masar RP-100	23,53	2,35	0,24
УКМ	48,75	10,50	0,12

Оценку абсолютных значений показателей технического уровня модели получали путем сравнения с соответствующими значениями базового образца.

Так как качество оборудования повышается при снижении значений указанных абсолютных показателей, расчет относительных показателей качества (оценок) определяли по формуле:

$$K_i = \left(\frac{P_i}{P_i^{\text{баз}}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где

P_i – значение показателя качества оцениваемой модели взбивальной машины;

$P_i^{\text{баз}}$ – соответствующее значение показателя качества модели взбивальной машины, принятого за базовый при сравнении.

В качестве базового образца приняли модель Foodatlas B-40BA (Китай).

Обобщенную оценку технического уровня каждой модели определяли с использованием средневзвешенной арифметической величины:

$$K_{\text{ТУ}} = \sum_1^3 m_i \times K_i, \quad (2)$$

где

m_i – коэффициент весомости показателя;

K_i – оценка показателя.

Приняты следующие значения коэффициентов весомости: удельная мощность – 0,65; удельная занимаемая площадь – 0,20; удельная масса – 0,15 для оборудования пищевых производств.

В таблице 3 приведены единичные и комплексная оценка технического уровня исследуемых моделей взбивального оборудования.

Таблица 3. Единичные и комплексные оценки массогабаритных и энергетических характеристик взбивального оборудования

Тип модели	Оценка показателя S_y	Оценка показателя M_y	Оценка показателя N_y	Обобщенная оценка технического уровня модели
МПВ-100	1,22	1,15	2,27	1,90
МВУ-100	1,30	1,17	1,39	1,34
МТИ-100	0,87	0,47	1,48	1,21
МПЛ-40	0,69	0,79	1,33	1,12
Gostrorag B-40-HG	1,06	0,89	1,33	1,21
Foodatlas B-40BA	1,00	1,00	1,00	1,00

Миксер планетарный Aрach APL20B	0,65	1,50	1,33	1,22
Миксер STENO P-80L3VP	1,30	0,97	2,67	2,14
Миксер STENO PI-40L/VE	0,34	1,06	1,82	1,41
Миксер планетарный CPM 800-CE Hamilton Beach	0,62	1,00	0,27	0,45
Миксер планетарный ERGO (B-10)	0,70	1,25	1,35	1,21
Миксер планетарный ERGO (B-20)	0,63	1,25	0,91	0,90
MB-40	0,85	0,75	1,33	1,15
Sigma BM-10	0,35	0,59	1,35	1,04
Взбивальная машина MB-6	0,46	0,64	1,67	1,27
Взбивальная MB-35	1,05	0,75	2,33	1,84
Взбивальная машина MB- 40	0,85	0,79	1,33	1,15
Взбивальная машина MB- 60	1,30	0,56	1,36	1,23
Машина взбивальная BM- 10	0,40	0,68	0,91	0,77
Машина PSP-800	1,84	2,19	2,11	2,07
Блендер Masar RP-100	0,50	1,59	0,21	0,48
УКМ	0,24	0,36	0,43	0,38

Результаты расчета обобщенной оценки массогабаритных и энергетических параметров рассмотренных моделей взбивального оборудования (без учета ШХ) показали, что наилучшую оценку технического уровня ($K_{ту}$) имеют миксер STENO P-80L3VP (2,14) и машина PSP-800 (2,07).

Низшую оценку технического уровня среди рассмотренных моделей имеют миксер планетарный CPM 800-CE Hamilton Beach (0,45), блендер Masar RP-100 (0,48), машина взбивальная BM-10 (0,77).

Результаты свидетельствуют, что обобщенная оценка массогабаритных и энергетических показателей взбивального оборудования увеличивается с увеличением объема дежи машин.

3. Количественная оценка качества взбивального оборудования с учетом ШХ

Для оценки взбивального оборудования с учетом его шумовой характеристики использованы следующие показатели:

- удельная масса машины $M_{уш} = m/L_{РА}$, [кг/ дБА];
- удельное потребление электроэнергии $N_{уш} = N/L_{РА}$, [Вт/ дБА];
- удельная занимаемая площадь машины $S_{уш} = F'/L_{РА}$, [м²/ дБА].

где $L_{РА}$ – скорректированный по А уровень звуковой мощности машины (3-6)

Таблица 4. Удельные значения показателей качества взбивального оборудования с учетом ШХ

Тип модели	Удельная занимаемая площадь, $\text{м}^2/\text{дБА} \cdot 10^{-3}$, S_y	Удельная масса, $\text{кг}^3/\text{дБА}$, M_y	Удельная мощность, $\text{кВт}/\text{дБА}$, N_y
МПВ-100	10,61	3,611	0,024
МВУ-100	10	3,556	0,040
МТИ-100	14,85	8,889	0,037
МПЛ-40	7,503	2,111	0,017
Gostrorag B-40-HG	4,969	1,888	0,017
Foodatlas B-40BA	5,249	1,685	0,022
Миксер планетарный Arach APL20B	4,704	0,658	0,010
Миксер STENO P-80L3VP	8,571	3,690	0,018
Миксер STENO PI-40L/VE	17,5	1,785	0,014
Миксер планетарный CPM 800-CE Hamilton Beach	2,007	0,400	0,020
Миксер планетарный ERGO (B-10)	1,982	0,357	0,004
Миксер планетарный ERGO (B-20)	4,248	0,690	0,013
МВ-40	6,18	2,247	0,017
Sigma BM-10	4,603	0,877	0,005
Взбивальная машина МВ-6	1,727	0,398	0,002
Взбивальная МВ-35	4,478	2,011	0,009
Взбивальная машина МВ-40	6,18	2,135	0,017
Взбивальная машина МВ-60	5,567	4,124	0,023
Машина взбивальная BM-10	3,989	0,749	0,007
Машина PSP-800	3,096	0,832	0,012
Блендер Masar RP-100	0,548	0,055	0,005
УКМ	5,804	1,250	0,014

Таблица 5. Единичные и комплексные оценки массогабаритных и энергетических характеристик взбивального оборудования

Тип модели	Оценка показателя S_y	Оценка показателя M_y	Оценка показателя N_y	Обобщенная оценка технического уровня модели
МПВ-100	0,49	0,47	0,90	0,75
МВУ-100	0,52	0,47	0,55	0,53
МТИ-100	0,35	0,19	0,59	0,48

МПЛ-40	0,70	0,80	1,32	1,12
Gostrorag B-40-HG	1,06	0,89	1,31	1,19
Foodatlas B-40BA	1,00	1,00	1,00	1,00
Миксер планетарный Aрach APL20B	1,12	2,56	2,23	2,06
Миксер STENO P- 80L3VP	0,61	0,46	1,23	0,99
Миксер STENO PI- 40L/VE	0,30	0,94	1,58	1,23
Миксер планетарный CPM 800-CE Hamilton Beach	2,62	4,21	1,10	1,87
Миксер планетарный ERGO (B-10)	2,65	4,72	4,99	4,48
Миксер планетарный ERGO (B-20)	1,24	2,44	1,74	1,74
MB-40	0,85	0,75	1,31	1,13
Sigma BM-10	1,14	1,92	4,34	3,34
Взбивальная машина MB-6	3,04	4,24	10,76	8,23
Взбивальная MB-35	1,17	0,84	2,55	2,02
Взбивальная машина MB-40	0,85	0,79	1,31	1,14
Взбивальная машина MB-60	0,94	0,41	0,97	0,88
Машина взбивальная BM-10	1,32	2,25	2,94	2,51
Машина PSP-800	1,70	2,02	1,91	1,88
Блендер Masar RP-100	9,58	30,75	4,02	9,14
УКМ	0,90	1,35	1,61	1,43

Результаты расчета обобщенной оценки массогабаритных и энергетических параметров рассмотренных моделей взбивального оборудования (с учетом ШХ) показали, что наилучшую оценку технического уровня имеют блендер Masar RP-100 (9,14), взбивальная машина MB-6 (8,23). Низшую оценку технического уровня (Кту) среди рассмотренных моделей имеют МТИ-100 (0,48), МБУ-100 (0,53), взбивальная машина МБУ-100 (0,53), МПВ-100 (0,75). Результаты свидетельствуют, что обобщенная оценка массогабаритных и энергетических показателей взбивального оборудования уменьшается с увеличением уровня звуковой мощности.

Графическая интерпретация обобщенных показателей качества взбивального оборудования представлены на рисунке 1 в виде профилограмм.

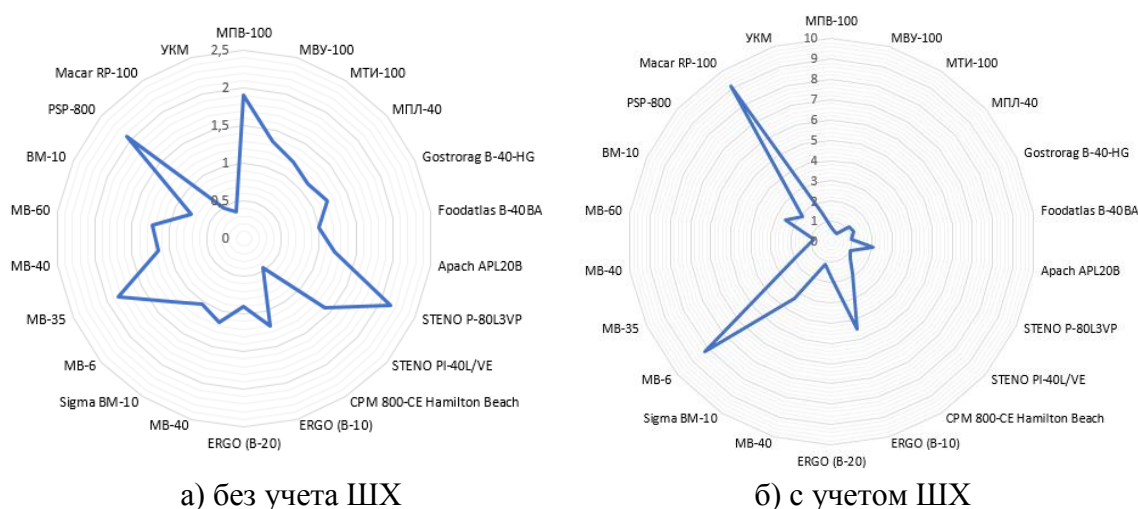


Рисунок 1. Обобщенная оценка технического уровня модели

4. Заключение

Анализ полученных данных показал, что обе методики (без учета шума и с его учетом) дают разные показатели качества, погрешность составляет от 20-200% в большую или меньшую сторону. Поэтому целесообразно рассчитывать показатели качества с учетом шумовой характеристики оборудования. С увеличением объема дежи взбивальных машин, их массы и номинальной мощности показатели качества и технологического уровня ухудшаются.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Заплетников, И. Н. Виброакустика оборудования пищевых производств: монография / И. Н. Заплетников; издание второе перераб. и доп. – Донецк: Фолиант, 2022. – 757с.
2. Топольник, В. Г. Количественная оценка качества оборудования общественного питания: монография / В. Г. Топольник. – Донецк: Кассиопея, 1998. – 196 с. – ISBN 966-7418-22-7.
3. Заплетников, И. Н. Шумовые характеристики взбивальной машины для эксплуатации на предприятиях общественного питания / И. Н. Заплетников, А. В. Гордиенко, А. К. Пильненко // «Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств»: Междун. научно-технич. конф., 16-17 ноября 2016г. / ред. А. Н. Остриков [тезисы докл.] – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГУИТ», 2016. – С. 585-589.
4. ГОСТ Р 51400-99 (ИСО 3743-1-94, ИСО 3743-2-94). Шум машин. Определение уровней звуковой мощности источников шума по звуковому давлению. Технические методы для малых переносных источников шума в реверберационных полях в помещениях с жесткими стенами и в специальных реверберационных камерах. – М.: Госстандарт России, 2000. – 19с.
5. Иванов, Н. И. Защита от шума и вибрации. Учебное пособие / Н. И. Иванов, А. Е. Шушарин; изд. 2-е, доп. и перераб. – Печатный цех, 2019. – 284с.
6. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник, 3-е изд. перераб. и доп. / Н. И. Иванов. – М.: Логос, 2013. – 432с.

Поступила в редколлегию 24.02.2023 г.

УДК 621.01

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

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КИНЕМАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАКАТКИ ОРЕБРЕНИЯ МЕДНЫХ ТРУБ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ

В настоящей работе изложены результаты исследований, проведенных на основе анализа кинематической цепи технологического обеспечения на предмет взаимодействия элементов оснастки и инструментов с заготовкой при формировании профиля оребрения трубы маслоохладителя методом накатки без снятия стружки. Разработана методика расчета геометрических элементов профилирующих роликов, учитывающая статические и динамические нагрузки, возникающие как в зоне взаимодействия накатных роликов с трубой в процессе профилирования, так и кинематической цепи при передаче соответствующих движений в процессе накатки на все подвижные элементы цепи. Приведены зависимости в формализованном виде, указывающие характер влияния ФОТ-воздействий, учитывающие влияние внутренних факторов кинематической цепи технологического обеспечения процесса (ТОП), на ФОС готовой детали согласно КД.

Ключевые слова: медная труба, оребрение, система координат, ФОТ-воздействие, функционально-ориентированные свойства (ФОС), кинематическая цепь, инструменты, формализация записи, сила воздействия.

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

METHOD OF CALCULATION OF KINEMATIC-DYNAMIC INTERACTION OF TECHNOLOGICAL SUPPORT ELEMENTS OF KNURLING OF COPPER PIPES OF OIL COOLERS

This paper presents the results of studies conducted on the basis of the analysis of the kinematic chain of technological support for the interaction of tooling elements and tools with the workpiece during the formation of the finning profile of the oil cooler pipe by rolling without chip removal. A method has been developed for calculating the geometric elements of the profiling rollers, taking into account static and dynamic loads that occur both in the zone of interaction of the rolling rollers with the pipe during profiling, and the kinematic chain when transmitting the corresponding movements during rolling to all moving elements of the chain. The dependencies are given in a formalized form, indicating the nature of the influence of PHOTO effects, taking into account the influence of internal factors of the kinematic chain of technological support of the process (TOP), on the FOS of the finished part according to the CD.

Keywords: copper pipe, finning, coordinate system, PHOTO-impact, functionally oriented properties (FOS), kinematic chain, tools, recording formalization, impact force.

1. Введение

Оребрение труб маслоохладителя возможно как методом механической обработки за счет удаления лишнего металла с заготовки, так и путем формирования требуемого профиля по указанной в КД геометрии без удаления металла.

Без удаления металла методом накатки профилирование можно осуществлять путем использования разных кинематических схем. В частности, профиль можно накатывать плашками, а можно накатывать роликами. При этом осуществляется взаимодей-

© Михайлов А.Н., Котляров В.Б., Котляров Б.С., Котляров С.Б.; 2023

ствии инструмента с заготовкой с разными скоростями и направлениями относительными движениями и с разной схемой силового взаимодействия, под разной динамической нагрузкой.

В настоящей работе более детально рассматривается схема взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки, при которой накатка профиля из цельной медной трубы осуществляется комплектом накатных роликов, установленных в накатной головке в едином корпусе под скрещивающимися углами. Схема устройства для обеспечения такого способа накатки приведена на рис. 1.

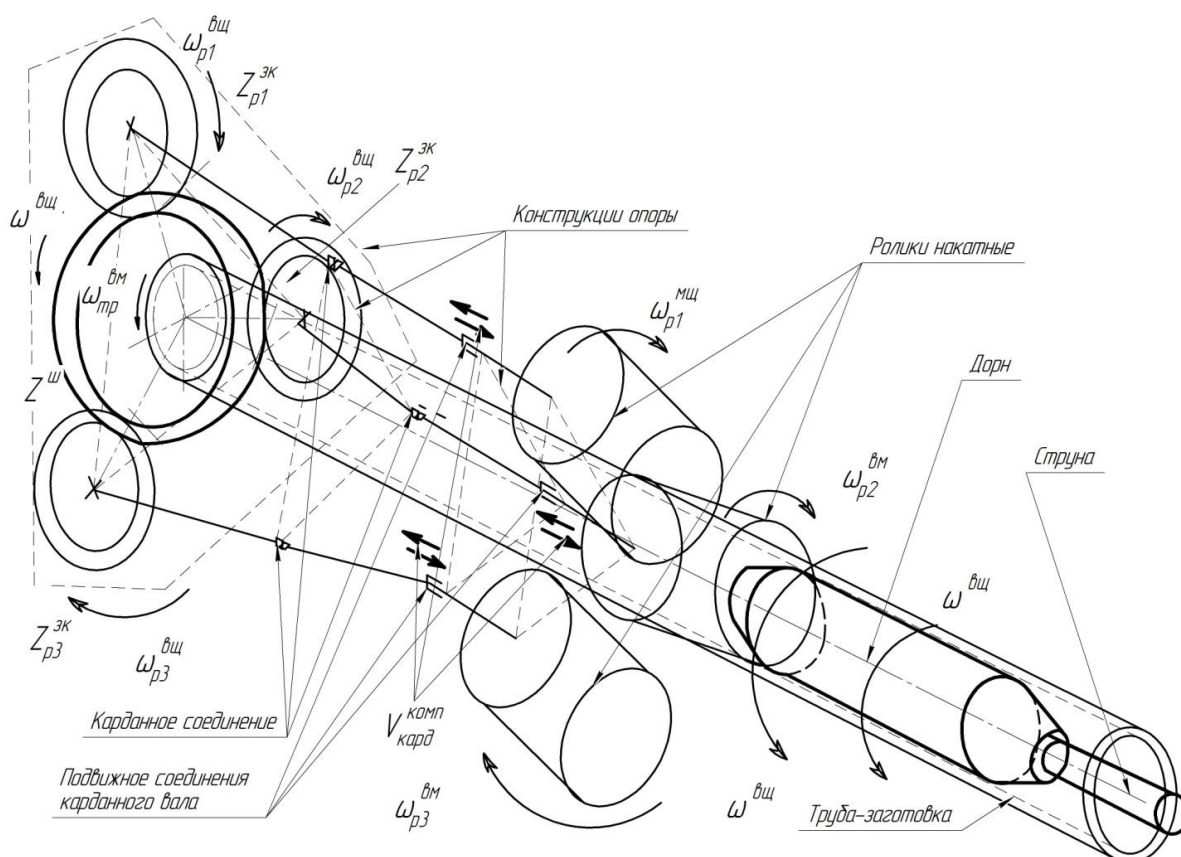


Рисунок 1. Аксонометрическое представление схемы накатки профиля на трубе

Кинематическая схема указанного устройства для профилирования оребренных труб маслоохладителей приведена на рис. 2.

Исходя из общей целевой функции детали, определяем набор частных целевых функций для каждого участка и зоны детали. При этом целевая предназначенность каждого отдельного участка определяет ФОС - функционально-ориентированные свойства, участков и зон, которые принадлежат геометрическим формам и поверхностям деталей. Обеспечение этих ФОС предполагает приложение различных технологических воздействий с целью их формирования [1, 2, 3]. Режимы кинематического и динамического взаимодействия определяются расчетным методом, основываясь на схеме моделирования процесса, при котором часть металла переносится из одной зоны детали в другую под воздействием выдавливания инструментом с клиновидным профилем в осевом сечении (роликов) [4, 5].

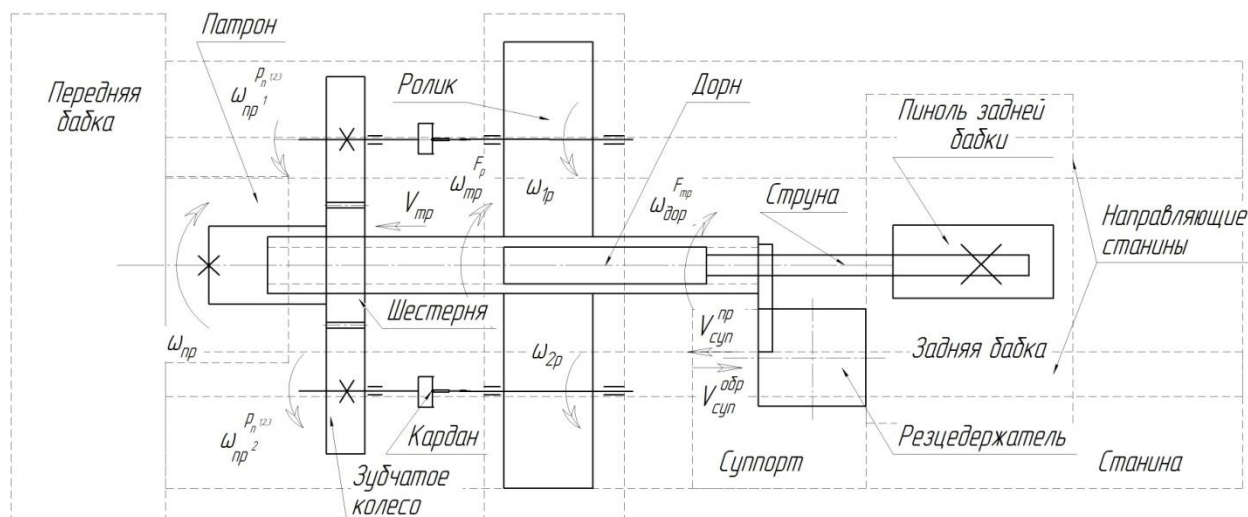


Рисунок 2. Кинематическая схема технологического обеспечения накатки профиля трубы

2. Цель и задачи

Целью настоящей работы является определение параметров технологического обеспечения для формирования заданных свойств детали отдельных участков и зон детали путем реализации процесса безотходного перемещения части материала в зоны детали методами холодной объемной и поверхностной пластической деформации - ХОПД.

Для достижения цели работы потребовалось решить ряд частных технических задач:

1. Разработать кинематическую схему осуществления процесса накатки профиля на трубу методом ХОПД;
2. Установить взаимодействующие элементы кинематической схемы и характер их взаимодействия, формализовать запись кинематических взаимоотношений элементов;
3. Установить динамические составляющие процесса профилирования и привести запись формальных силовых взаимоотношений элементов технологии;
4. Разработать алгоритм расчета технологической цепочки накатки ребер и порядок формализованной записи связей конструктивных свойств и признаков ФОТ-систем для реализации необходимых ФОС готовой детали.

3. Основное содержание

Система технологического обеспечения профилирования оребренных труб из меди для маслоохладителей, схема которой приведена на рис. 1 и рис. 2, представляет собой комплект отдельных элементов, объединенных обобщенной целевой функцией, и включает в себя:

- собственно технологическую машину для оребрения труб;
- объект труда – заготовку в виде медной трубы диаметром 22х 4 мм;
- схему энергетического обеспечения;
- схему управления процессом.

Рассмотрим, какие кинематические цепи и элементы должны присутствовать в технологической системе для того, чтобы обеспечить все необходимые относительные движения формирующих органов и заготовки, а также их силовые взаимодействия для обеспечения процесса профилирования труб.

Очевидно, что в качестве расчетной схемы следует рассматривать схему формообразования с линейчатым контактом [6], который осуществляется между формирующим роликом и профилируемой трубой в сечении плоскости, перпендикулярной оси трубы по витку линии подъема винтовой линии профиля. Условно схема рабочего сечения в зоне формообразования представлена на рис. 3.

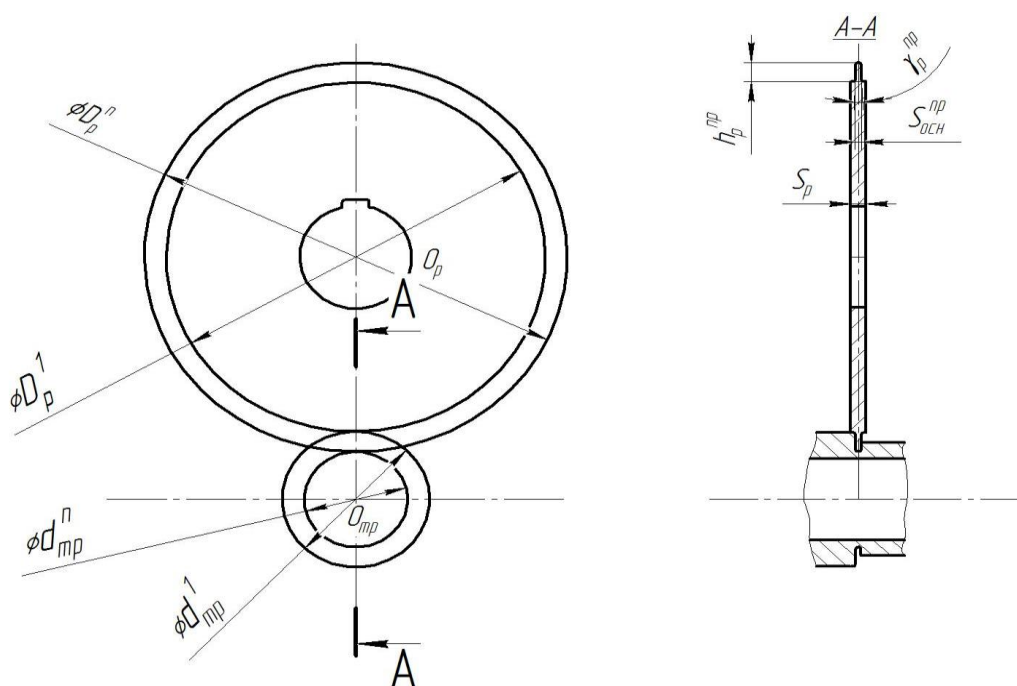


Рисунок 3. Схема сечения ролика и трубы в зоне контакта при профилировании витка

Кинематическое и силовое динамическое взаимодействие в рабочем сечении между контактирующими элементами и частями ролика и трубы представлено на рис. 4. и рис. 5.

Скорости в каждой точки линии контакта в плоскости зацепления ролика и профилируемой заготовки изменяется от V_1 до V_n и в каждой точке контакта происходит взаимное проскальзывание и за счет этого возникают силы сдвига, перемещающие металл заготовки в свободные зоны при профилировании. Величины сил в точках контакта переменные, изменяются по криволинейному закону, и ориентировочно эпюра распределения может быть представлена так, как на рис. 5.

Очевидно, что при вращении роликов ω_p^i с угловой скоростью для любой точки профиля, максимальная окружная скорость V_n присуща вершине профиля в n -й точке по сечению на рис. 4, и равна $V_n = \omega_p^i \times R_p^n$, где R_p^n - радиус крайней точки n на вершине профиля ролика. Эта точка профиля контактирует с точкой формируемого про-

филя на минимальном диаметре трубы, которая при вращении имеет минимальную окружную скорость V_{mp}^n , определяемую в виде:

$$V_{mp}^n = i_{cp}^{p-mp} \times \omega_p^n \times r_{mp}^n, \tag{1}$$

где i_{cp}^{p-mp} - передаточное отношение от вращающихся роликов вращающейся от сил трения трубе-заготовке.

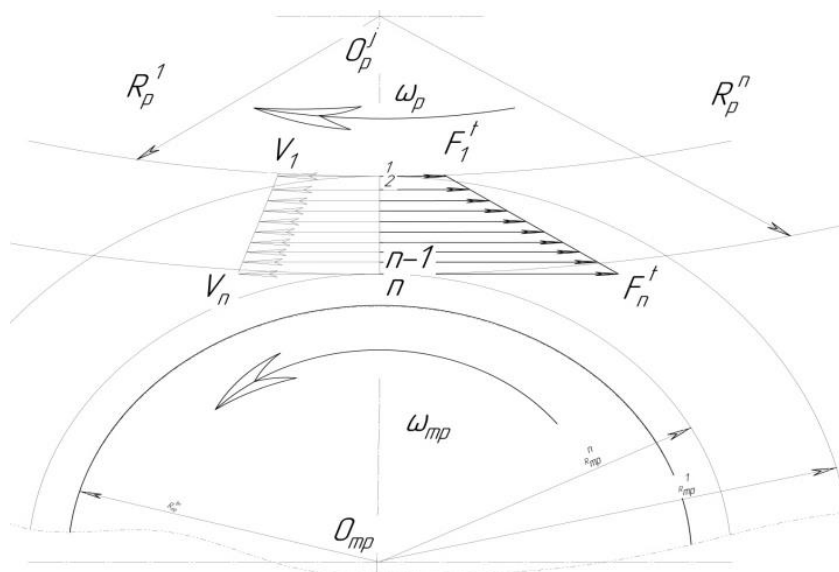


Рисунок 4. Направление действия скоростей и силового взаимодействия в рабочем сечении схемы формообразования

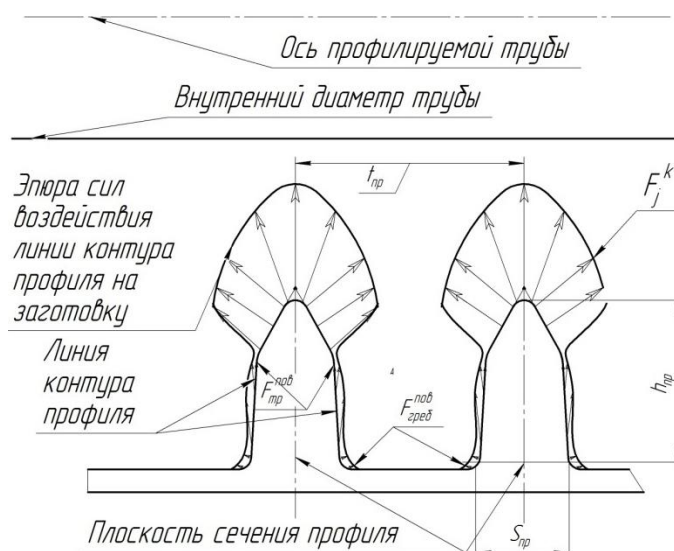


Рисунок 5. Силовое действие контура профиля на металл профилируемой трубы в сечении плоскости взаимодействия

При этом максимальная разность радиусов крайних контактирующих с заготовкой точек профиля роликов составляет величину высоты профиля, т. е. $R_p^n = R_p^1 + h_p^{np}$. В таком же соотношении отличаются максимальный и минимальный радиусы контактных точек витков профилируемой трубы, $r_{mp}^1 = r_{mp}^n + h_{mp}^{np}$, при этом $h_h^{np} = h_{mp}^{np}$.

Исходя из предположения, что от средней точки контакта точек на профиле трубы и точек контакта роликов направление проскальзывания направлены в обратные стороны, в средней точке проскальзывание отсутствует. В средней точке профилей окружная скорость ролика V_p^{cpTnp} и окружная скорость трубы V_{mp}^{cpTnp} равны:

$$V_p^{cpTnp} = V_{mp}^{cpTnp} = \omega_p \times (R_p^n - \frac{1}{2} h_p^{np}), \text{ где } h_p^{np} = h_{mp}^{np} - \text{высота профиля ролика и}$$

трубы.

Длина линии одновременного контакта ролика с заготовкой в процессе накатки профиля обозначим $l_{кон}$ и состоит она из всех участков профиля от дна до вершины витка. В зонах контакта боковых поверхностей формирующих профиль роликов с заготовкой в среднем толщина деформируемого слоя $\Delta_{деф}$ материала составляет 0,3- 0,4 мм. Усилие $F_{см}$ смятия и сдвига слоя материала в процессе профилирования определяется в виде:

$$F_{см} = l_{кон} \times \Delta_{деф} \times S_{сеч} \times E_M, \quad (2)$$

где E_M – модуль упругости (допускаемое усилие сдвига) для меди.

Необходимо отметить, что в выражении (2) дано обобщенное представление сил, воздействующих поверхностями формирующего ролика на формируемый материал трубы при оребрении. Часть поверхности ролика, вершина которого оформленная в виде клина, вдавливающегося в поверхность трубы, выдавливает материал из общего объема, составляющего стенку трубы, в пространство над поверхностью трубной заготовки, при этом происходит частичное уплотнение материала. В этих зонах профиля, относящихся к вершинам профиля в плоском сечении, существенное значение имеют силы, нормальные к поверхностям ролика в зонах контакта. В зонах поверхностей роликов, относящихся условно к основаниям (как указано в плоском сечении на рис. 4 и на рис. 5), поверхности профилей выполняют роль ограничивающих элементов. Они формируют гребенчатый профиль оребрения трубы маслоохладителя с развитой поверхностью охлаждения. При этом усилия давления металла по нормальным направлениям к поверхностям практически отсутствуют. В большей степени проявляется действие усилий трения по поверхностям роликов у основания, которые формируют геометрию ребер и выглаживают поверхности, преодолевают возмущающие силы сопротивления при трении. Такое взаимодействие сил трения по стенкам ребер профиля способствует повышению чистоты и качества поверхностей профильных элементов, вследствие чего повышаются эксплуатационные свойства труб маслоохладителя.

Следует отметить, что диаметры вершин формообразующих роликов имеют разные величины от минимального размера до максимального - в средней части набора. Из-за этого взаимодействие роликов с заготовкой происходит по-разному. Общий характер силового взаимодействия при контакте поверхностей роликов и трубной заготовки, а также характер наружных поверхностей гребней при образовании профилей трубы представлен на рис. 6.

На разных роликах возникают разные реакции материала от поверхности трубы-заготовки на накатные ролики, что обусловлено, главным образом, разной величиной глубины вдавливания вершин роликов в тело трубы и разной толщиной слоя материала на боковой поверхности профилей, перемещаемого в свободное пространство.

Так на рис. 6а приведена схема воздействия сил от роликов на зону трубы, которая находится между двумя боковыми поверхностями самих роликов. При этом в процессе пластической деформации материала под воздействием раздвигающего клина ролика силы действуют на внутренний диаметр трубы-заготовки, а вследствие контакта трубы с дорном возникает реакция по перпендикулярному направлению к трубе. Благодаря этим силам металл перемещается от средней части к периферии трубы и формируется верхняя наружная поверхность гребня профиля.

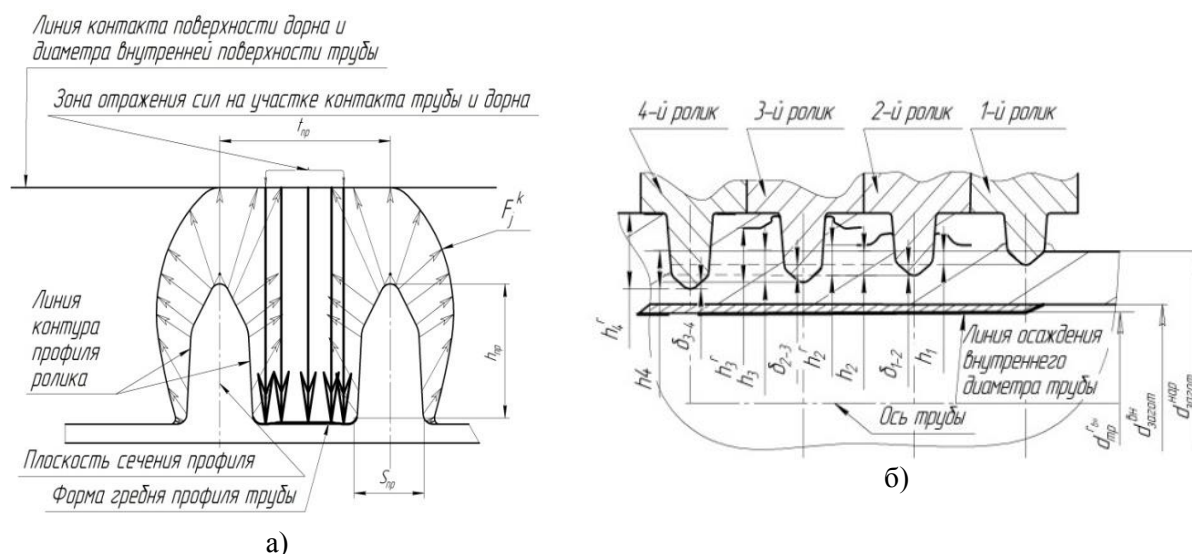


Рисунок 6. Воздействие сил на реальный профиль и формирование границ поверхностей гребней и боковых поверхностей профиля.

- а) прямые и отраженные силы взаимодействия;
- б) линии границ элементов при последовательном воздействии роликов разных диаметров по возрастающей

На рис. 6б последовательно представлен процесс врезания первых роликов в трубу-заготовку, где на первом ролике выдавливается минимальный объем металла, на втором ролике с большим диаметром происходит более глубокое внедрение ролика в металл трубы, а на третьем формирующем ролике уже происходит выдавливание металла к боковым поверхностям роликов. Далее контакт осуществляется с калибрующими роликами – с 4-го по 7-й, при контакте которых с трубой формируется окончательный размер элементов профилированной трубы маслоохладителя. При минимальном диаметре вершины 1-го ролика D_{\min}^{P1} размер по вершинам последующих роликов возрастает на величину δ_{1-2} , δ_{2-3} , δ_{3-4} для 2-го, 3-го и 4-го роликов соответственно. При этом для канавок роликов диаметр $D_{вн}^P$ для всех роликов одинаков, контакт выдавливаемого с поверхностью дна первых трех роликов не происходит.

Весь порядок и последовательность расчета функционально-ориентированных свойств технологической системы профилирования труб охлаждения можно представить в виде алгоритма на рис. 7.

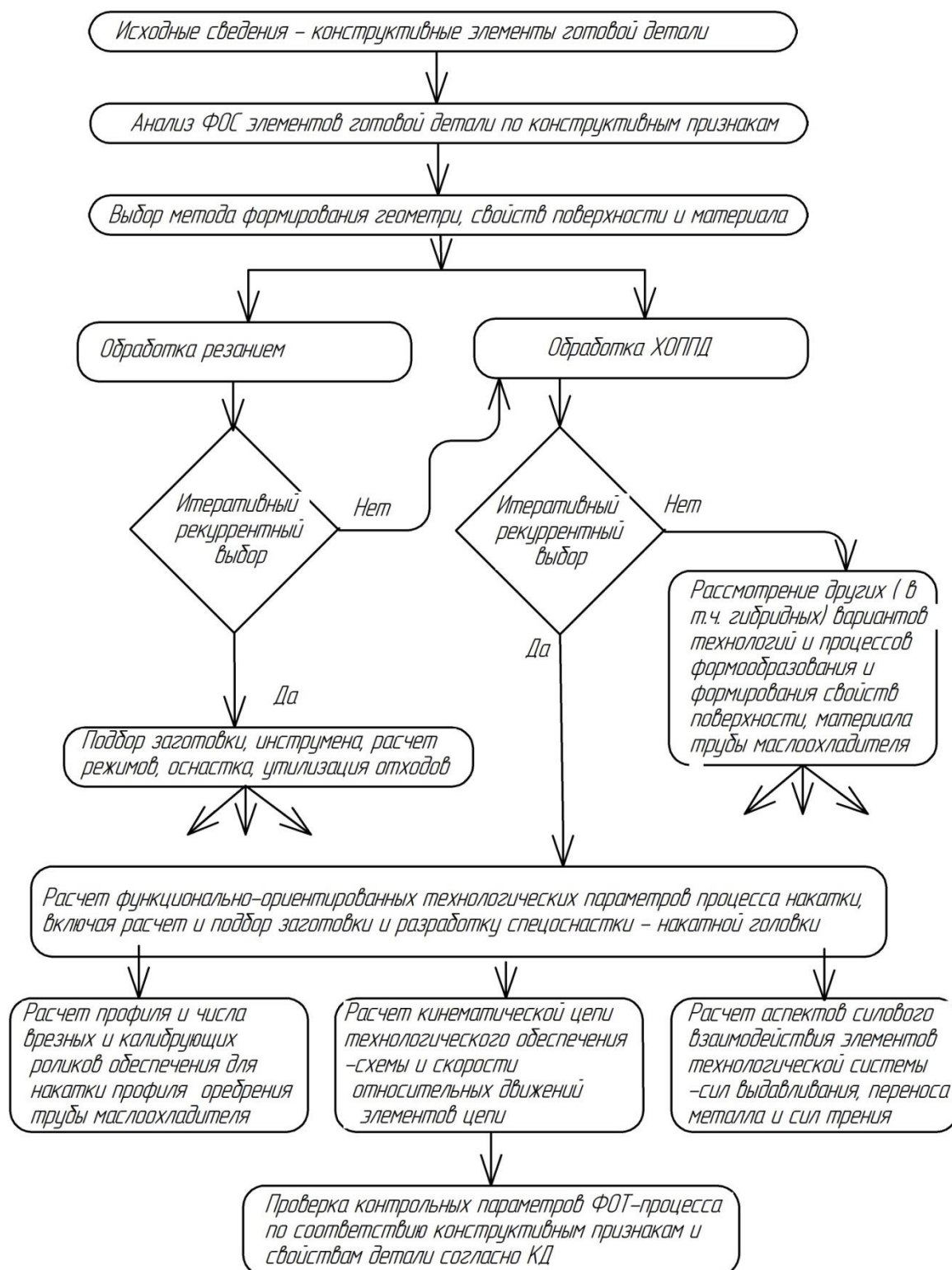


Рисунок 7. Алгоритм разработки ФОТ-процесса оребрения труб маслоохладителя

Расчет диаметров заготовки и роликов, а также ширины канавок между роликами осуществляется исходя из объемов перемещаемого металла с учетом изменения величин диаметров, как вершин профиля, так и изменения диаметра внутренней поверхности трубы-заготовки, контактирующей с дорном.

Учитывая то, что обобщенное усилие $F_{см}$ воздействия на трубу можно представить выражением (1), можно записать окружное усилие F_{τ} через расчетное усилие $F_{см}$ в виде:

$$F_{\tau} = F_{см} \times \kappa_{м} \times r_{рол}^{ср}, \quad (3)$$

где $r_{рол}^{ср}$ - средний диаметр боковой поверхности площади контакта ролика с трубой, а $\kappa_{м}$ – коэффициент трения при контакте ролика и трубы по среднему диаметру.

После выполнения расчетов всех параметров конструктивных элементов, включенных в технологическую систему накатки ребер, а также расчета параметров кинематической и динамической схемы взаимодействия каждого накатного ролика с трубой-заготовкой в процессе формообразования витков и формирования поверхностных свойств можно считать задачу создания ФОТ-процесса накатки ребер решенной.

Заключение.

Результаты проведенных в настоящей работе исследований позволили получить решение ряда поставленных задач и достичь намеченной цели.

Решен ряд следующих частных задач:

1. Разработана кинематическая схема осуществления процесса накатки профиля на трубу методом ХОППД, которая включает необходимые механизмы приводов движения подвижных элементов технологической системы с учетом величин передаточных отношений по всей кинематической цепи;

2. Установлен комплекс элементов кинематической схемы и характер оформления конструктивных элементов их взаимодействия, приведена формализация записи кинематических взаимоотношений элементов технологической цепи;

3. Установлены динамические составляющие функционально-ориентированной технологической системы для реализации процесса профилирования трубы и приведена система записи формальных силовых взаимоотношений элементов технологии;

4. Разработан алгоритм расчета технологической динамико-кинематической цепи накатки ребер и порядок формализованной записи связей конструктивных свойств и признаков ФОТ-систем для реализации необходимых ФОС готовой детали.

Таким образом, в настоящей работе решен ряд частных задач общей методической части общей системы разработки ФОТ изготовления деталей машиностроительного комплекса методами ХОППД, в частности, с применением безотходных технологий формообразования и формирования ФОС. Приведен порядок проведения расчетов и дан алгоритм разработки технологической системы для накатки труб маслоохладителей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Анализ деталей по функциональным признакам участков и зон согласно уровню и глубине технологического обеспечения целевой функции / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные техноло-

гии и системы машиностроения: Международный сборник научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 1 (76). – С. 43-52. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

2. Михайлов, А. Н. Синтез структурных схем функционально-ориентированного технологического воздействия при формообразовании и формировании поверхностных свойств деталей КПП / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – Вып. 2 (73). – С. 53-67. – ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

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

4. Миропольский, Ю. А. Накатывание резьб и профилей / Ю.А. Миропольский, Э. П. Луговой – М.: Машиностроение, 1976. – 175 с.

5. Адакин, В. А.. Инструмент для многопроходного холодного накатывания прямоугольных шлицевых профилей на валах: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Адакин: Санкт-Петербург – 2014.

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

7. Михайлов, А. Н. Порядок технологического обеспечения разработки ФОТ оребренных медных труб маслоохладителей маневровых тепловозов / Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б., Пичко А. П. // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12-18 сентября 2022 г. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – С. 186-194.

Поступила в редколлегию 16.03.2023г.

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

Д. А. Михайлов¹, канд. техн. наук, доц., В. А. Витренко², д-р техн. наук, проф.,
А. Н. Михайлов³, д-р техн. наук, проф., В. А. Михайлов⁴, канд. техн. наук, ст. преп.,
Е. А. Шейко¹, канд. техн. наук, доц.

¹ ГБОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС ДНР», ДНР, Россия

² ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля», ЛНР, Россия

³ ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, Россия

⁴ Воркутинский филиал Ухтинского государственного технического университета, Республика Коми, Россия

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ ВЕРТОЛЕТНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе рассмотрены технологические особенности формирования функционально-ориентированных свойств элементов структуры газотурбинного двигателя. Представлены схемы изменяющихся параметров функционально-ориентированных свойств в пространстве детали. Показано, что процесс обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры вертолетного газотурбинного двигателя должен выполняться в соответствии со структурой действия неравномерных эксплуатационных воздействий. В работе разработана общая методика формирования функционально-ориентированных свойств структуры двигателя. В качестве примера приведены два варианта распределения свойств по структуре двигателя на базе вакуумных электродуговых покрытий. Приведен график зависимости микротвердости покрытия от содержания алюминия в катоде, а также представлена схема определения параметров состава катода для напыления покрытия на рабочие лопатки в зависимости от номера ступени компрессора. Показано, что процесс напыления функционально-ориентированного покрытия на лопатку двигателя выполняется в соответствии с разработанным способом. Представлены технологические особенности реализации функционально-ориентированных покрытий.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, структура, функционально-ориентированные свойства, распределение свойств, эксплуатация.

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

TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FORMATION FUNCTIONALLY-ORIENTED PROPERTIES OF ELEMENTS HELICOPTER GAS TURBINE ENGINE STRUCTURES

The paper considers the technological features of the formation of functionally oriented properties of the structural elements of a gas turbine engine. Schemes of changing parameters of functionally oriented properties in the part space are presented. It is shown that the process of providing functionally oriented properties of the structure of a helicopter gas turbine engine must be carried out in accordance with the structure of the action of uneven operational impacts. In this work, a general method for the formation of functionally oriented properties of the engine structure has been developed. As an example, two options for the distribution of properties over the structure of an engine based on vacuum ion-plasma coatings are given. A graph of the dependence of the microhardness of the coating on the aluminum content in the cathode is presented, as well as a scheme for determining the parameters of the cathode composition for spraying the coating on the rotor blades depending on the compressor stage number. It is shown that the process of spraying a functionally oriented coating on an engine blade is carried out in accordance with the developed method. The technological features of the implementation of functionally oriented coatings are presented.

Keywords: gas turbine engine, structure, function-oriented properties, distribution of properties, operation.

1. Введение

В последнее время, для повышения эксплуатационных свойств вертолетных газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2, 3] в ряде работ [4, 5, 6, 7, 8, 9] предлагается использовать функционально-ориентированные свойства (ФОС) [4] их элементов, дета-

лей и узлов. Здесь, предлагается для отдельных элементов и деталей использовать ФОС, выполняемые на базе ряда особых принципов ориентации эксплуатационных параметров, технических свойств (физико-механические свойства материала) и технологических воздействий. Вместе с тем, можно отметить, что вертолетный двигатель представляет собой сложную систему, состоящую из множества элементов и подсистем, представляющих собой иерархическую структуру R -уровней. При этом в процессе эксплуатации вертолетного ГТД из-за сложной его иерархической структуры происходят неравномерные износы элементов двигателя, характеризующиеся неравномерностями R -родов. Поэтому вследствие обеспечения ФОС элементов ГТД происходит одинаковый износ каждого элемента двигателя, но для всей структуры этот процесс не выполняется. Это обусловлено наличием сложной структуры авиационного двигателя и особенностями его эксплуатации.

В данной работе решается вопрос обеспечения необходимых эксплуатационных свойств всего вертолетного ГТД в целом (заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие эксплуатационные свойства) и выполнения равных, кратных или функционально-зависимых свойств всех элементов структуры. Этот процесс может быть выполнен на базе специального формирования ФОС по элементам и особенностям их распределения по элементам структуры двигателя.

Целью данной работы является решение вопросов технологического формирования ФОС (физико-механические свойства (ФМС)) элементов структуры вертолетного ГТД на основании двух условий, а именно, первого условия - обеспечения эксплуатационных свойств всего двигателя (заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие свойства) и второго условия - распределения ФОС по всем элементам структуры с обеспечением равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств всех элементов структуры.

В соответствии с поставленной целью в данной работе определены следующие задачи: выполнить анализ особенностей действия неравномерных эксплуатационных воздействий на элементы структуры вертолетного ГТД и предложить схемы изменяющихся параметров ФОС в пространстве детали; разработать общую методику формирования ФОС структуры элементов ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий R -родов; предложить конкретные варианты распределения ФОС по структуре элементов ГТД на основе вакуумных электродуговых покрытий.

Эти задачи решаются в данной работе.

2. Особенности формирования ФОС по структуре элементов вертолетного ГТД

В представленной работе рассмотрены особенности обеспечения ФОС вертолетного ГТД. При этом установлено, что процесс обеспечения ФОС структуры нужно рассматриваться как причинно-следственную последовательность векторов параметров эксплуатационных воздействий, технических свойств ФОС, физико-механических свойств (ФМС) и эксплуатационных свойств (безотказность, надежность, долговечность, ресурс, ремонтпригодность или восстанавливаемость):

$$\vec{ЭВ} \rightarrow \vec{ТС(ФОС)} \rightarrow \vec{ФМС(ФОС)} \rightarrow \vec{ЭС(ФОС)}, \quad (1)$$

где $\vec{ЭВ}$ - вектор неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ) на структуру;

$\vec{ТС(ФОС)}$ - вектор технических параметров ФОС элементов структуры, формируемых на базе группы особых принципов ориентации, который характеризуется составом,

структурой, пространственным контуром границ (ПКГ) износа и обеспечения свойств, количеством и другими параметрами материала ФОС;

$\vec{\PhiМС}(\PhiОС)$ - вектор неравномерных параметров ФМС элементов структуры с ФОС (интенсивность износа, интенсивность накопления усталостных повреждений при изгибе, интенсивность накопления контактных повреждений материала и тому подобное);

$\vec{\mathcal{E}С}(\PhiОС)$ - вектор эксплуатационных свойств (параметров) ФОС элементов структуры (безотказность, надежность, долговечность, ремонтпригодность, восстанавливаемость).

Процесс обеспечения ФОС элементов и структуры вертолетного ГТД можно описать следующими отображениями:

$$\left. \begin{aligned} \psi_1: \vec{\mathcal{E}В} &\rightarrow \vec{TС}(\PhiОС); \\ \psi_2: \vec{TС}(\PhiОС) &\rightarrow \vec{\PhiМС}(\PhiОС); \\ \psi_3: \vec{\PhiМС}(\PhiОС) &\rightarrow \vec{\mathcal{E}С}(\PhiОС); \\ \psi_4: \vec{\mathcal{E}С}(\PhiОС) &\rightarrow \vec{\mathcal{E}В}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ - функции отображения векторов параметров эксплуатационных воздействий, технических свойств, физико-механических параметров, эксплуатационных свойств, соответственно.

Следует также иметь в виду, что технические параметры и физико-механические свойства ФОС определяются группой особых принципов ориентации свойств, получаемых на этапе эксплуатации ГТД, а формируемых на этапах обеспечения ФОС и реализации технологического обеспечения.

В работе исследованы особенности и варианты процессов формирования ФОС по элементам ГТД. При этом установлено, что ФОС элементов вертолетного ГТД характеризуются следующими особенностями:

1. Изменяющимися в пространстве (зона, линия, поверхность, поверхностный слой, объем) параметрами состава, ФМС, технологическими особенностями материала элемента (1-й принцип ориентации).
2. Изменяющимися топологическими и геометрическими параметрами свойств материала элемента (2-й принцип ориентации).
3. Изменяющимся количеством микрозон, макрозон, зон элемента (3-й принцип ориентации).
4. Изменяющейся в пространстве структурой свойств элемента (4-й принцип ориентации) и другими параметрами других принципов группы, особых принципов ориентации свойств и параметров в зависимости от особенностей эксплуатации элемента структуры и параметров технологических воздействий.

На рис. 1 представлена схема изменяющихся параметров ФОС в пространстве. Здесь показано: рис. 1, а – изменяющиеся параметры свойств в одном направлении, рис. 1, б - изменяющиеся параметры в двух направлениях, рис. 1, в – изменяющиеся параметры в трех направлениях.

Конечно, возможны и другие схемы свойств элементов структуры, например, на рис. 2 представлена схема изменяющихся параметров ФОС на поверхности элемента

вертолетного ГТД. Здесь показано: рис. 2а – ступенчато-изменяющиеся свойства, рис. 2б - пятнистые свойства, рис. 2в – градиентные свойства.

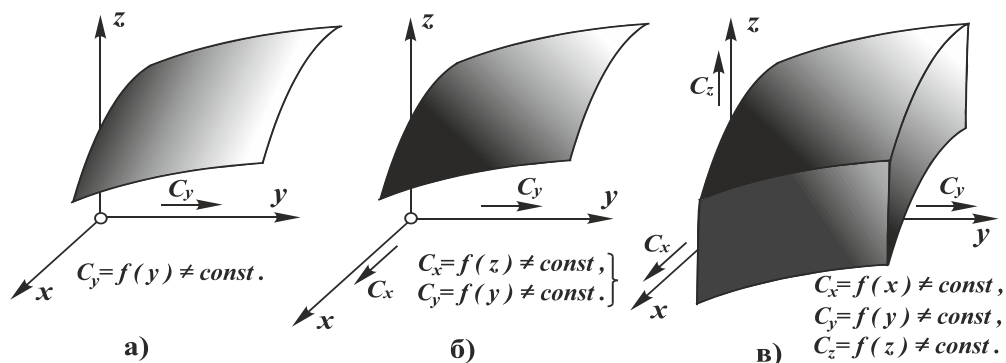


Рисунок 1. Схемы изменяющихся параметров ФОС элемента вертолетного ГТД: а – изменяющиеся параметры в одном направлении, б - изменяющиеся параметры в двух направлениях, в – изменяющиеся параметры в трех направлениях

Можно отметить, что в целом пространственно-изменяющиеся свойства (ФОС) элементов ГТД по своей топологии могут быть следующих вариантов:

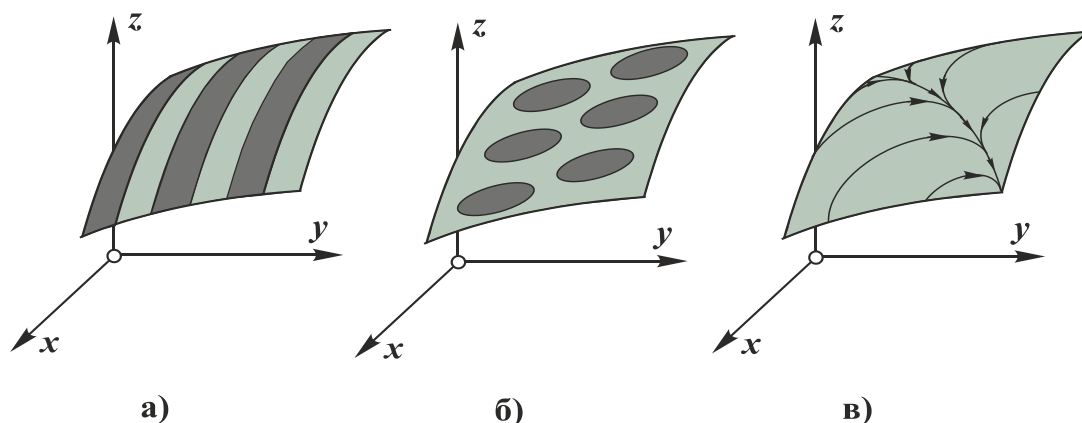


Рисунок 2. Схемы изменяющихся параметров ФОС на поверхности элемента вертолетного ГТД: а – ступенчато-изменяющиеся свойства, б – пятнистые свойства, в – градиентные свойства

- точно выполненные схемы ФОС элементов - в соответствии с действующими на них параметрами эксплуатационных воздействий (точная схема ФОС элемента);
- упрощенные варианты схем ФОС, близкие схемы реализации свойств, выполняемые более простыми методами (например, со ступенчатыми параметрами свойств).

Для элементов ГТД с объемно-изменяющимися вариантами схем ФОС элементов возможны схемы, представленные на рис. 3. Здесь показаны следующие схемы ФОС: рис. 3а – свойства элементов изменяющиеся в цилиндрической системе координат, рис. 3б - свойства элементов изменяющиеся в сферической системе координат, рис. 3в – пространственные свойства элементов изменяющиеся ступенчато. Возможны и другие варианты схем ФОС элементов ГТД. Например, с помощью многослойных

вакуумных ионно-плазменных покрытий с ПКГ каждого слоя, обеспечивается возможность формирования ФОС лопатки со ступенчатыми свойствами по толщине покрытия лопатки [10]. А также, изменяющиеся свойства лопатки с ФОС можно обеспечивать посредством комбинации свойств гребенчатой основы лопатки и свойств наполнителя, формируемого из керамики [11].

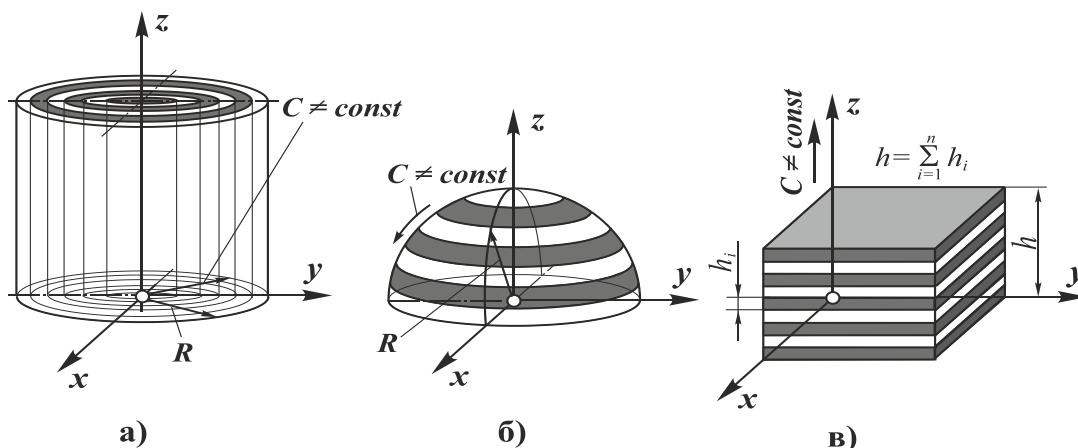


Рисунок 3. Схемы изменяющихся параметров ФОС по объему элемента вертолетного ГТД: а – по радиусу цилиндра - ступенчатые свойства, б – по слоям шара – ступенчатые свойства, в – модульные покрытия

Таким образом, ФОС элементов ГТД формируются на базе группы особых принципов ориентации в зависимости от особенностей их эксплуатации. При этом параметры свойств элементов могут отображаться адекватно особенностям эксплуатации (износы, разрушения) или формироваться приближенно по элементам структуры на базе многовариантных схем ФОС.

В работе также выполнены исследования по решению вопросов обеспечения ФОС по структуре вертолетного ГТД. При этом установлено, что процесс обеспечения ФОС структуры вертолетного ГТД должен выполняться в соответствии со структурой действия неравномерных эксплуатационных воздействий (ЭВ) и иметь следующий состав:

- структура ФОС 1-го вида;
- структура ФОС 2-го вида;
- структура ФОС 3-го вида;
-;
- структура ФОС r -го вида;
-;
- структура ФОС R -го вида.

Можно отметить, что процесс формирования ФОС структуры вертолетного ГТД заключается в выполнении двух условий:

- на базе первого условия обеспечиваются ЭС всего ГТД, а именно формируются заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие ЭС всей структуры двигателя; это условие реализуется относительно 1-го элемента структуры, на который действует максимальные ЭВ, именно для него задаются эти свойства;
- на базе второго условия выполняется процесс распределения ЭС по структурным элементам каждого уровня ГТД в соответствии с выражениями (2), (3) или (4), в

$$\left. \begin{aligned} C_{r1} &= f_{r1}(t) ; \\ C_{r2} &= f_{r2}(t) ; \\ C_{r3} &= f_{r3}(t) ; \\ &\dots\dots\dots \\ C_{ri_r} &= f_{ri_r}(t) ; \\ &\dots\dots\dots \\ C_{rn_r} &= f_{rn_r}(t), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где C_{ri_k} - параметры ЭС (надежность, безотказность, долговечность (ресурс), ремонтно-пригодность, восстанавливаемость) i_r -го элемента r -го уровня структуры вертолетного ГТД;

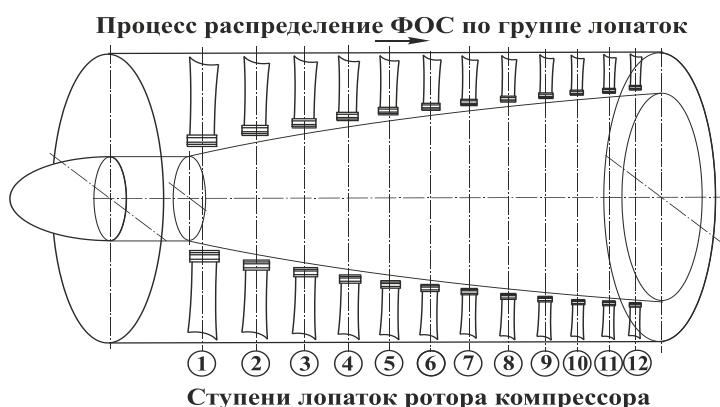
n_r – количество элементов r -го уровня структуры вертолетного ГТД;

R – количество уровней структуры вертолетного ГТД;

k_{ri_r} - коэффициент кратности параметров ЭС для i_r -го элемента r -го уровня структуры вертолетного ГТД;

$f_{ri_r}(t)$ - функциональная зависимость ЭС i_r -го элемента r -го уровня структуры вертолетного ГТД.

Следует отметить, что сам процесс распределения ФОС в зависимости от особенностей действия ЭВ выполняется на базе представленного ранее способа распределения ФОС (ФМС) по элементам структуры ГТД, при комплексном инжиниринге параметров и связей.



На рис. 4, в качестве примера, приведена схема процесса распределения ФОС по группе рабочих лопаток ротора компрессора ГТД. Здесь, цифрами показаны номера ступеней рабочих лопаток ротора, процесс распределения выполняется от лопаток 1-й ступени ротора к последующим рабочим лопаткам ротора компрессора.

Рисунок 4. Схема процесса распределения ФОС по группе рабочих лопаток ротора компрессора ГТД

Для вертолетного ГТД, например серии ТВ3-117, на первой ступени лопаток компрессора действуют максимальные ЭВ.

3. Общая методика формирования ФОС структуры вертолетного ГТД

В работе разработана общая методика формирования ФОС структуры вертолетного ГТД, которая выполняется в следующей последовательности:

1. Выполняется классификация элементов структуры вертолетного ГТД и создание иерархической структуры элементов (рис. 5), в которой на каждом уровне этой структуры элементы располагаются в зависимости от параметров действия ЭВ, сначала, выявляется 1-й элемент, на который действуют максимальные ЭВ, затем, располагаются элементы, в соответствии со структурой, исключая 1-й элемент, а уровни струк-

туры – соответствуют порядку иерархической структуры вертолетного ГТД. Поэтому данная классификация структуры вертолетного ГТД имеет новое содержание.

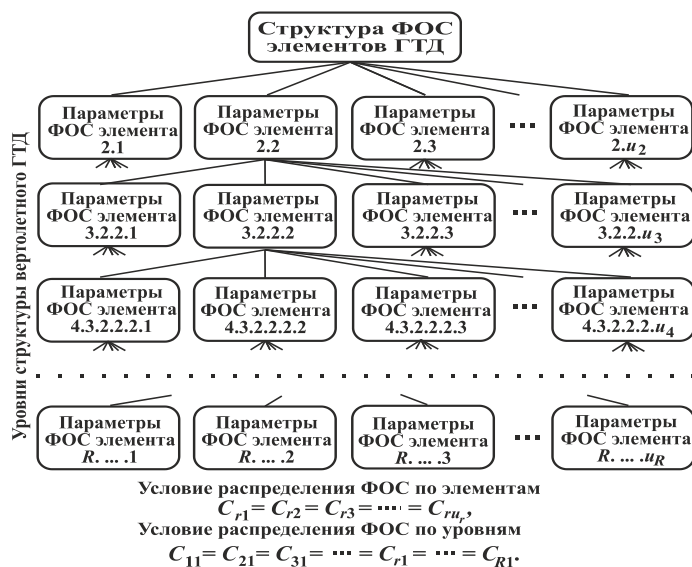


Рисунок 5. Классификация структуры ФОС элементов ГТД в зависимости от расположения предельных элементов

ционально-зависимые ЭС), который представлен выражениями (2), (3) или (4).

3. В соответствии с определенными начальными параметрами ЭС реализуется процесс их формирования для всех элементов структуры вертолетного ГТД, который выполняется в следующей последовательности, сначала - для 1-го уровня иерархической структуры, затем - для 2-го уровня, далее, этот процесс производится - для всех других иерархических уровней, пока все уровни структуры будут пройдены.

4. Далее, производится формирование ФОС каждого элемента структуры в соответствии с группой особых принципов ориентации свойств или на основании разработанного способа обеспечения ФОС [4].

5. Определяются связи параметров ФОС между элементами каждого уровня и между уровнями иерархической структуры вертолетного ГТД.

В соответствии с этой методикой в работе разработан алгоритм формирования ФОС структуры и элементов вертолетного ГТД, который базируется на итерационно-рекуррентной последовательности обеспечения и распределения свойств по иерархической структуре элементов авиационного двигателя.

4. Варианты распределения ФОС по структуре элементов ГТД на основе вакуумных электродуговых покрытий

В работе выполнены исследования особенностей формирования ФОС структуры рабочих лопаток компрессора ГТД по рабочим лопаткам различных ступеней компрессора. Данные исследования производились на базе вакуумных электродуговых покрытий методом PVD (Physical vapour deposition), которые в данной работе называются функционально-ориентированные покрытия (ФОП). В этом случае, процесс распределения параметров ФОП выполнялся по ступеням рабочих лопаток компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117 для 12-ти ступеней.

В качестве примера приведено два варианта распределения ФОП рабочих лопаток компрессора по ступеням:

2. Производится комплексный инжиниринг параметров свойств на этапе эксплуатации и формирования ФОС элементов структуры, производится определение параметров износа и разрушения элементов структуры, осуществляется определение начальных параметров ЭС структуры вертолетного ГТД: в соответствии с первым принципом назначаются параметры ЭС всего вертолетного ГТД (заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие ЭС), в соответствии с вторым принципом определяется и назначается закон распределения ЭС по структуре каждого уровня элементов (равные, кратные, функционально-зависимые ЭС), который представлен выражениями (2), (3) или (4).

1. Распределение параметров ФОП с одинаковым составом катода из Ti (покрытие TiN) и изменяющейся толщиной h_i покрытия пера лопатки в зависимости от номера ступени компрессора (различная интенсивность η_i износа покрытия пера лопатки по ступеням) (табл. 1, позиция 1).

2. Распределение параметров ФОП с различным составом Al в катоде (покрытие (Ti, Al)N) (обеспечение одинаковой интенсивности η_i износа покрытия пера лопатки по ступеням) (табл. 1, позиция 2; табл. 2; рис. 6).

Можно отметить, что процесс распределения параметров для первого варианта распределения ФОП по структуре рабочих лопаток выполнялся на базе нитрид титанового покрытия TiN и установленной интенсивности износа покрытия лопаток на каждой ступени лопаток компрессора, полученной на основании проведенных исследований вертолетных ГТД на ГП «Луганский авиационный ремонтный завод», параметры которых представлены в табл. 1, позиция 1. Применение ФОП этого варианта обеспечивает единовременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, что дает возможность повышения уровня ремонтпригодности лопаток, и значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора в 1,55 раза по сравнению с обычным вариантом нитрид титанового покрытия.

По второму варианту распределения параметров ФОП с различным составом Al в катоде (покрытие (Ti, Al)N) результаты распределения представлены в табл. 1, позиция 2. Для этого построен график зависимости параметров микротвердости покрытия (Ti, Al)N от содержания алюминия в катоде (рис. 6), представленных в табл. 2. Эти экспериментальные исследования выполнялись на установке ННВ 6.6-И1, катоды с различным содержанием Al изготовлены ООО «Риал», г. Запорожье. А также, на рис. 6 представлена схема распределения состава покрытия в зависимости от содержания алюминия в катоде и микротвердости μ_n покрытия подложки (образцов-свидетелей).










Можно отметить, что значения параметров ФМС (микротвердость) покрытия предельного элемента (лопатки) - для 1-й ступени компрессора назначены по максимальному значению микротвердости покрытия. В этом случае, состав катода для лопаток 1-й ступени должен иметь следующие параметры 29Ti-71Al, для лопаток других ступеней параметры катода представлены в табл. 1, позиция 2. За счет выполнения различной микротвердости покрытия лопаток по структуре ступеней компрессора обеспечивается одинаковая интенсивность абразивно-эрозионного износа и толщина покрытия по лопаткам всех ступеней компрессора. Можно отметить, что разработанная схема распределения состава покрытия (состава катода) по структуре ступеней рабочих лопаток компрессора базируется на исследованиях проф. Хрущева М. М., в которых установлена связь износа (интенсивности износа) образца в зависимости от параметров его твердости, а именно параметров его износа, который пропорционален параметрам ЭВ на образец, коэффициентам концентрации воздействующей среды (пыль, песок и тому подобное) потока по тракту двигателя, его скорости и обратно пропорционален твердости материала. При этом параметры микротвердости покрытия для каждой ступени компрессора определяется на основании следующего выражения:

$$\mu_{H_i} = \xi_i \mu_{H_1},$$

Таблица 1. Варианты и параметры распределения ФОП по структуре рабочих лопаток компрессора вертолетного ГТД серии ТВ3-117

№ ц/п	Основные параметры	Номера ступеней рабочих лопаток компрессора											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Особенности распределения параметров ФОП с одинаковым составом катоды из Ti (покрытие TiN)												
1.1	Одинаковый состав покрытия	Нитрид титановое покрытие с изменяющейся толщиной по ступеням											
1.2	Толщина покрытия пера в зоне шах ЭВ, h_i (мкм)	8,50	8,40	8,12	7,75	7,29	6,65	6,01	5,44	6,09	6,73	7,39	7,85
1.3	Интенсивность износа ФОП в зоне шах ЭВ, $\eta_i \cdot 10^{-3}$ (мкм/час)	4,23	4,18	4,04	3,86	3,63	3,31	2,99	2,71	3,03	3,35	3,68	3,91
1.4	Относительная неравномерность износа лопаток, ξ	1,0	0,989	0,955	0,913	0,859	0,783	0,706	0,641	0,717	0,793	0,869	0,924
1.5	Длительность межремонтного ресурса, $R_{\text{жр}}$ (час)	$R_{\text{жр}} = 2009$ час (стандартный межремонтный ресурс с традиционными покрытиями – 1300 час)											
1.6	Особенности применения ФОП для структуры лопаток	Единовременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора.											
2	Особенности распределения параметров ФОП с различным составом Al в катоды (покрытие (Ti, Al)N)												
2.1	Микроудельный вес покрытия, μ_4 (ГПа)	40,50	40,05	38,68	36,98	34,79	31,71	28,59	25,96	29,04	32,12	35,19	37,42
2.2	Изменяющийся состав катодов для формирования покрытий по ступеням компрессора (определяется по графику рис. 19)	29 Ti - 71 Al	35 Ti - 65 Al	40 Ti - 60 Al	43 Ti - 57 Al	54 Ti - 46 Al	64 Ti - 36 Al	73 Ti - 27 Al	85 Ti - 15 Al	70 Ti - 30 Al	62 Ti - 38 Al	52 Ti - 48 Al	41 Ti - 59 Al
2.3	Интенсивность износа ФОП в зоне шах ЭВ, $\eta_i \cdot 10^{-3}$ (мкм/час)	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51
2.4	Закономерности износа ФОП лопаток по всей структуре	При толщине $h_i = 5,5$ мкм - межремонтный ресурс $R_{\text{жр}} = 2191$ час (увеличение в 1,68 раза), При толщине $h_i = 8,5$ мкм - межремонтный ресурс $R_{\text{жр}} = 3386$ час (увеличение в 2,60 раза)											
2.5	Особенности применения ФОП для структуры лопаток	Единовременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора.											

Таблица 2. Параметры для построения графика зависимости микротвердости покрытия (Ti, Al)N от содержания алюминия в катоде напыляемого методом PVD

№ п/п	Параметры	Номер испытания								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Номер подложки (образца-свидетеля)	б/н	№33	№32	№22	№29	№30	№18	№6	№17
2	Состав катода	Ti (BT 1-00)	Ti-12Al	Ti-19Al	Ti-27Al	Ti-36Al	Ti-47Al	Ti-58Al	Ti-70Al	Ti-85Al
3	Формула покрытия	TiN	(Ti, Al)N							
4	Материал подложки	Сталь 08X17T								
5	Вид обработки подложки	Полировка ($R_a = 0,06$ мкм)								
6	Микротвердость покрытия, μH (ГПа)	24,5	26,1	27,0	27,2	30,0	36,7	38,0	40,8	30,0
		23,8	24,6	26,2	28,0	31,8	35,6	38,8	40,5	30,9
		23,0	25,4	26,6	29,0	32,1	34,9	39,4	40,2	29,6
7	Технологические параметры процесса	1. Ток дуги – $I_d = 100$ А. 2. Отрицательное смещение на подложке – $V_c = 90$ А. 3. Ток фокуса - $I_\phi = 0,8$ А. 4. Давление азота – $P = 0,5$ Па.								
8	Общий вид образца-свидетеля с покрытием (цвет)									

где μH_i - микротвердость покрытия лопаток компрессора i -й для ступени;

μH_i - максимальная микротвердость покрытия лопатки компрессора в точке b_1 графика рис. 6 (значение определяется по ординате в точке a_1);

ξ_i - относительная неравномерность интенсивности износа лопаток компрессора i -ступени.

Применение приведенного ФОП лопаток для различных ступеней компрессора обеспечивает одновременный одинаковый износ покрытия лопаток всей структуры, значительное повышение межремонтного ресурса лопаток компрессора. В этом случае, при толщине покрытия лопаток $h_i = 5,5$ мкм - межремонтный ресурс имеет следующие параметры $R_m = 2191$ час (увеличение в 1,68 раза), при толщине $h_i = 8,5$ мкм - межремонтный ресурс составляет $R_m = 3386$ час (увеличение в 2,60 раза). Сравнение этих параметров выполнено для ФОП лопаток с одинаковым составом катода (позиция 1, табл. 1).

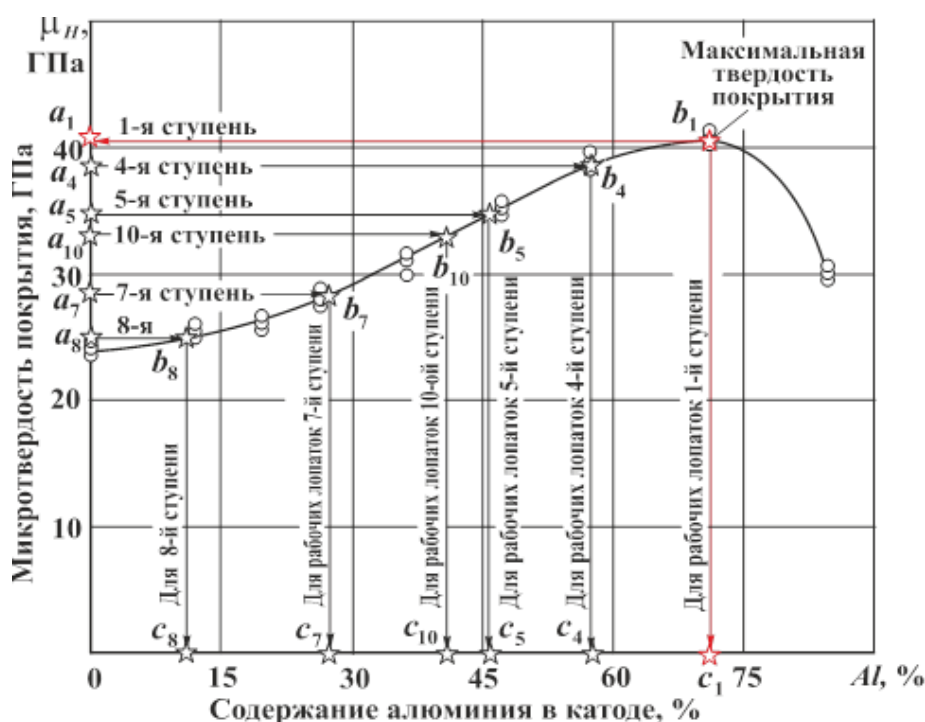


Рисунок 6. График зависимости микротвердости покрытия от содержания алюминия в катодe и схема определения параметров состава катодa для напыления покрытия на рабочие лопатки в зависимости от номера ступени компрессора для вертолетного ГТД серии ТВ3-117

Можно отметить, что после определения параметров состава покрытия по ступеням компрессора (по структуре лопаток компрессора), в соответствии с разработанным способом распределения состава покрытия, выполняется процесс формирования конкретного ФОП для группы одинаковых рабочих лопаток каждой ступени компрессора. Этот процесс выполняется, например, в соответствии с разработанным способом нанесения функционально-ориентированного покрытия на лопатку газотурбинного двигателя [10].

5. Заключение

Таким образом, в данной работе решены вопросы технологического формирования ФОС элементов структуры вертолетного ГТД. Данный процесс выполнен на основании двух условий, а именно, первого условия - обеспечения эксплуатационных свойств всего двигателя (заданные, требуемые, предельные, ограниченные или другие свойства) и второго условия - распределения ФОС по всем элементам структуры с обеспечением равных, кратных или функционально-зависимых эксплуатационных свойств всех элементов структуры. Для этого здесь выполнен анализ особенностей действия неравномерных эксплуатационных воздействий на элементы структуры вертолетного ГТД. А также рассмотрены некоторые варианты изменяющихся параметров ФОС элементов. Предложены схемы изменяющихся параметров ФОС в пространстве детали. При этом разработана общая методика формирования ФОС структуры элементов ГТД, работающих в условиях действия неравномерных эксплуатационных воздействий R-родов. Кроме того, в представленной работе предложены конкретные варианты

распределения ФОС по структуре элементов ГТД, выполняемы на основе вакуумных электродуговых покрытий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьев, В. А. Вертолетные газотурбинные двигатели. / В. А. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
2. Демин, Ф. И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: Учеб. пособие. / Ф. И. Демин, Н. Д. Пронищев, И. Л. Шитарев. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с.
3. Богуслаев, В. А. Технология производства авиационных двигателей. В 3-х ч. Ч. III. Методы обработки деталей авиационных двигателей. / В. А. Богуслаев, [и др.]. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2008. – 638 с.
4. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
5. Михайлов, А. Н. Структурная надежность и методы повышения ресурса газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств. / А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.] // Научные технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2018. – № 3 (81). – С. 32-41.
6. Михайлов, А. Н. Методологические и технологические основы обеспечения функционально-ориентированных свойств структуры элементов газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Н. С. Пичко, Е. А. Шейко // Научные технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2022. – № 9 (135). – С. 38-48.
7. Михайлов, А. Н. Новые тенденции в повышении ресурса газотурбинных двигателей и установок на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, В. А. Михайлов, Д. А. Михайлов [и др.]. // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» в г. Петропавловск-Камчатский 17-19 октября 2018 г. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 106-111.
8. Михайлов, А. Н. Технологические особенности повышения ресурса деталей газотурбинных двигателей на основе обеспечения функционально-ориентированных свойств / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов // Инновации в машиностроении: сборник трудов XII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: НГТУ, 2021. – С. 76 – 83.
9. Михайлов, Д. А. К вопросу обеспечения функционально-ориентированных свойств структурным элементам газотурбинного двигателя на базе комплексного многосвязного технологического процесса / Д. А. Михайлов и [др.]. // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: Сб. трудов научного семинара технологов-машиностроителей. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. – С. 230-235.
10. Патент № 2718877 RU. Кл. C23C 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, В. А. Михайлов [и др.]. – № 2018107164; опубл. 15.04.2020. – Бюл. № 11. – 7 с.
11. Патент Украины на винахід № 94961. Кл. B23P 15/00. Лопатка газотурбинного двигуна. / Михайлов О. М., Недашковський О. П. Михайлова О. О., Михайлов Д. О.; опубл. 25.06.2011, Бюл. №12. – 5 с.

Поступила в редколлегию 17.03.2023 г.

УДК 621.838.222

М.П. Шишкарев, д-р техн. наук, проф.

Донской государственный технический университет, РФ

Тел.: 89081933393; E-mail: shishkarev_m_p@mail.ru

ПРИЧИНЫ НИЗКОЙ ТОЧНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В работе показано, что реальные адаптивные фрикционные муфты первого поколения обладают относительно невысокой точностью срабатывания вследствие постоянной величины коэффициента усиления в процессе автоматического регулирования. Невозможно создание адаптивной фрикционной муфты, полностью нечувствительной к изменению коэффициента трения.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, точность срабатывания, идеальная, коэффициент усиления, коэффициент трения.

M. P. Shishkarev

THE REASONS FOR THE LOW ACCURACY OF OPERATION OF ADAPTIVE FRICTION CLUTCHES OF THE FIRST GENERATION

The paper shows that real adaptive friction clutches of the first generation have a relatively low response accuracy due to the constant value of the gain in the process of automatic control. It is impossible to create an adaptive friction clutch that is completely insensitive to changes in the coefficient of friction.

Keywords: Adaptive friction clutch, accuracy of operation, ideal, gain, friction coefficient.

1. Введение

В работах [1, 2] приведена формула для определения значения коэффициента точности адаптивных фрикционных муфт (АФМ) с одноконтурной отрицательной обратной связью, т. е. АФМ первого поколения. Точность срабатывания АФМ характеризуется уровнем стабильности величины вращающего момента в течение регламентированного срока ее эксплуатации [3].

Анализ упомянутой формулы показал, что точность срабатывания АФМ зависит исключительно от собственного параметра муфт – коэффициента усиления (КУ) обратной связи. В указанных работах также установлено, что точность срабатывания АФМ повышается с увеличением КУ, однако при этом уменьшается величина номинального вращающего момента муфт [4].

Для компенсации уменьшения номинальной нагрузочной способности АФМ необходимо увеличение силы натяжения пружины, замыкающей пары трения, что требует использования более мощных пружин и приводит к росту массы и габаритных размеров муфт, практически прямо пропорциональному силе ее натяжения [5].

Цель исследования. Установление и научное обоснование причин низкой точности срабатывания АФМ первого поколения.

Задачи исследования. 1. Установление причин низкой точности срабатывания АФМ первого поколения 2. Оценка точности срабатывания «идеальной» АФМ. 3. Оценка перспектив конструктивных разработок муфт с одноконтурной отрицательной обратной связью без изменения принци-

пиальной схемы с целью повышения их точности срабатывания.

2. Основное содержание и результаты работы

Для оценки точности срабатывания реальной АФМ введем понятие «идеальной» муфты, т. е. муфты, величина вращающего момента которой постоянна, равна ее номинальному (настроечному) вращающему моменту и не зависит от изменяющегося значения коэффициента трения. Очевидно, что величина коэффициента точности «идеальной» АФМ равна единице. Также очевидно, что точность срабатывания реальной АФМ можно оценивать степенью приближения ее точности срабатывания к точности срабатывания «идеальной» АФМ.

Для объективности оценки точности срабатывания АФМ будем полагать, что сравниваемые объекты оснащены одним и тем же типом обратной связи – одноконтурной отрицательной обратной связью [6, 7]. Это предположение в значительной степени облегчает процесс сравнения, поскольку позволяет использовать один и тот же параметр обратной связи АФМ.

Объектом исследования является АФМ, принципиальная схема которой изображена на рис. 1. Муфта состоит из двух полумуфт 1 и 2, которые связаны друг с другом пакетом фрикционных дисков 3 и 4. Диски 3 связаны, в свою очередь, со ступицей нажимного диска 5, который не имеет кинематической связи со ступицей полумуфты 1. Диски 4 связаны с барабаном полумуфты 2.

Связь дисков 3 с нажимным диском 5 и дисков 4 с полумуфтой 2 осуществляется с помощью шлицевого подвижного соединения, позволяющего передавать осевое усилие между дисками.

Устройство

отрицательной обратной связи муфты состоит из тел качения 6, которые размещены в скошенных гнездах, выполненных в жестко закрепленном на ступице полумуфты 1 упорном диске 7 и в нажимном диске 5 (см. рис. 1, сечение А-А).

Силовое замыкание пакета фрикционных дисков осуществляется пружиной 8, которая передает усилие через упорный подшипник 9.

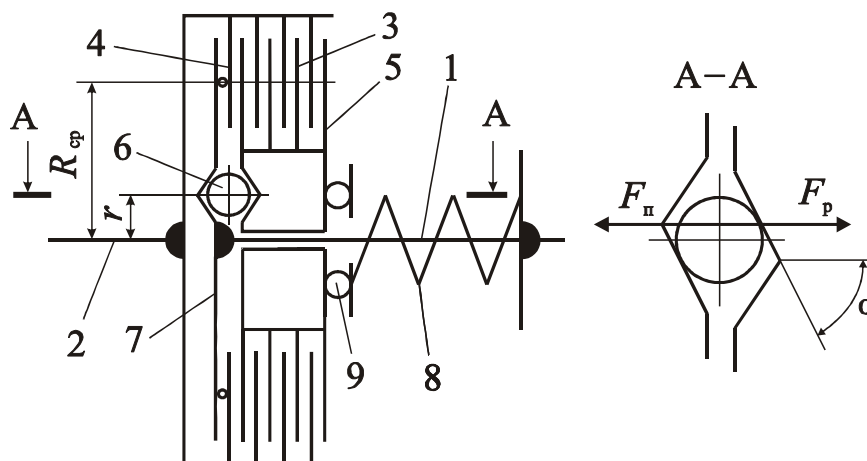


Рисунок – Принципиальная схема АФМ первого поколения со всеми ведущими парами

Часть вращающего момента от полумуфты 1 к полумуфте 2 передается за счет пары трения «фрикционный диск 4–упорный диск 7», остальная часть – телами качения 6, получающими нагрузку от полумуфты 1 через упорный диск, к нажимному диску 5, затем – парами трения «диски 3–диски 4». Вследствие этого все пары трения АФМ разделены на ведущую (первая из перечисленных выше, их может быть несколько) и ведомые.

При одинаковом типе обратной связи общий вид математической модели АФМ также одинаков и имеет следующую форму:

$$T_{ni} = zR_{cp}f_i(F_n - F_{pi}), \quad (1)$$

где T_{ni} – текущий предельный вращающий момент АФМ; z – число пар трения фрикционной группы муфты; R_{cp} – средний радиус поверхностей трения фрикционных пар 3–4; f_i – текущий коэффициент трения; F_n – сила натяжения замыкающей пружины 8; F_{pi} – текущая распорная сила управляющего устройства (УУ) обратной связи.

В формуле (1) параметром, регулирующим стабильность величины вращающего момента T_{ni} при условии, что $f_i = \text{var}$, является распорная сила F_{pi} , поэтому именно этот параметр обратной связи следует принять в качестве объекта сравнения в сопоставляемых вариантах муфт.

В работе [4] найдена функциональная зависимость величины текущей распорной силы, действующей в АФМ первого поколения, от коэффициента трения в следующем виде:

$$F_{pi} = F_n \frac{zCf_i}{1 + zCf_i}, \quad (2)$$

где C – КУ обратной связи.

Преобразуем формулу (2) к следующему виду:

$$F_{pi} = F_n \left(1 - \frac{1}{1 + zCf_i} \right). \quad (3)$$

В работе [4] также приведена аналогичная зависимость для «идеальной» АФМ, которая имеет вид:

$$F_{pi} = F_n \left(1 - \frac{f_{\min}}{f_i} \right), \quad (4)$$

где f_{\min} – минимальный (настроечный) коэффициент трения.

Формулы (3) и (4) имеют одинаковую общую структуру, однако в формуле (3) переменное значение коэффициента трения f_i представлено

двучленом в знаменателе вычитаемого, тогда как в формуле (4) – одночленом. Очевидно, что практическая идентичность зависимостей (3) и (4) может быть достигнута в том случае, когда $zCf_i \ll 1$, что при ограниченном значении коэффициента трения f_i (патологические процессы трения в данном случае не учитываются) требует значительного увеличения параметров z и C в отдельности или одновременно.

Технически осуществимое значительное увеличение параметров z и C приводит к резкому уменьшению значения приведенного коэффициента трения и, соответственно, величины вращающего момента АФМ [8].

Максимальная величина КУ АФМ с дифференцированными парами трения типа «ведущие пары – ведомые пары» ограничена в соответствии с неравенством

$$C \leq \frac{1}{f_{\max}},$$

где f_{\max} – максимальный коэффициент трения.

Данное ограничение не позволяет достичь высокую точность срабатывания АФМ.

В «идеальной» АФМ зависимость (4) реализуется посредством автоматического изменения величины КУ в процессе эксплуатации в соответствии с формулой, полученной в работе [9] и имеющей следующий вид:

$$C_i = \text{const} - \frac{1}{zf_i}, \quad (5)$$

для АФМ со всеми ведущими парами трения.

В формуле (5) параметр const – постоянный параметр АФМ, равный

$$\text{const} = \frac{1}{zf_{\min}}. \quad (6)$$

В АФМ первого поколения (базовый вариант) величина КУ остается постоянной при изменении значения коэффициента трения, поскольку принципиальная схема муфты не позволяет автоматически осуществлять подобное изменение величины КУ.

Автоматическое регулирование с помощью передаточного механизма, который располагается между УУ и фрикционной группой, предполагает переменное передаточное отношение. Данный способ повышения точности срабатывания АФМ в настоящее время не нашел практического воплощения вследствие отсутствия конструктивных решений, оптимальных с точки зрения их применения в конструкциях АФМ.

Реализация «идеальной» нагрузочной характеристики (4) АФМ также

представляется невозможной по следующим соображениям. Каждой конкретной величине распорной силы F_{pi} должна соответствовать строго определенная величина КУ C_i . Действительно, объединяя формулы (5) и (6), получим

$$C_i = \frac{1}{z} \left(\frac{1}{f_{\min}} - \frac{1}{f_i} \right). \quad (7)$$

Используя зависимость (7), выразим параметр f_i через КУ C_i и подставим данное представление в формулу (4). Получаем:

$$F_{pi} = zF_n C_i f_{\min}. \quad (8)$$

При постоянных значениях параметров z , F_n , f_{\min} и $C_i = \text{var}$ распорная сила F_{pi} прямо пропорциональна значению КУ [10]. Воспользовавшись формулой (1), запишем выражение для вычисления вращающего момента «идеальной» АФМ [11, 12] в том случае, когда коэффициент трения увеличивается от значения f_i до значения f_{i+1} , а перегрузка отсутствует

$$T'_{ni} = zR_{cp} f_{i+1} (F_n - F_{pi}). \quad (9)$$

В формуле (9) величина распорной силы F_{pi} соответствует значению коэффициента трения f_i .

При наступлении перегрузки величина установившегося вращающего момента АФМ вычисляется по следующему соотношению:

$$T_{ni+1} = zR_{cp} f_{i+1} (F_n - F_{pi+1}), \quad (10)$$

где F_{pi+1} – величина распорной силы, соответствующая значению коэффициента трения f_{i+1} .

Элементарный прирост величины вращающего момента АФМ, с учетом формул (8) – (10), вычисляется по соотношению:

$$\Delta T = z^2 F_n R_{cp} f_{\min} f_{i+1} (C'_{i+1} - C_i). \quad (11)$$

В соотношении (11) $C'_{i+1} = C_i + \Delta C_i$ (где ΔC_i – элементарный прирост текущей величины КУ).

Заменив ΔC_i на dC_i и интегрируя функцию (11) получаем формулу полного прироста величины вращающего момента в результате увеличения КУ от C_i до C_{i+1} :

$$\Delta T = \int_{C_i}^{C_{i+1}} z^2 F_n R_{cp} f_{\min} f_{i+1} dC_i = z^2 F_n R_{cp} f_{\min} f_{i+1} (C_{i+1} - C_i),$$

или, с учетом формулы (7)

$$\Delta T = \frac{zF_n R_{cp} f_{\min} (f_{i+1} - f_i)}{f_i}.$$

С учетом изложенного выше величина коэффициента точности «иде-

альной» АФМ вычисляется по следующей формуле:

$$K_{\tau} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}.$$

Таким образом, при перегрузке «идеальная» АФМ будет кратковременно передавать вращающий момент, величина которого превышает величину номинального вращающего момента муфты.

Обсуждение и результаты. Установленная причина относительно невысокой точности срабатывания реальных АФМ с одноконтурной отрицательной обратной связью, которая заключается в несоответствии величины КУ обратной связи каждому текущему значению коэффициента трения, определила способ ее устранения, состоящий в разработке принципиальной схемы муфт с автоматическим регулированием величины КУ обратной связи, функционально связанной с изменяющимся значением коэффициента трения по найденной зависимости.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке конструктивной схемы, исследовании и расчетах АФМ первого поколения с одноконтурной отрицательной обратной связью, обладающей повышенной точностью срабатывания.

3. Заключение

1. Реальные АФМ с одноконтурной отрицательной обратной связью обладают относительно невысокой точностью срабатывания вследствие постоянной величины КУ в процессе автоматического регулирования, что не может компенсировать их недостаток, заключающийся в повышенной конструктивной сложности.

2. «Идеальная» АФМ при автоматическом регулировании и увеличении коэффициента трения требует дополнительного вращающего момента, связанного с необходимостью увеличения КУ.

3. Исследование и установление причин относительно невысокой точности срабатывания реальных АФМ первого поколения показали бесперспективность дальнейших конструктивных разработок муфт с одноконтурной отрицательной обратной связью без изменения принципиальной схемы с целью повышения точности их срабатывания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Шишкарев, М. П. Анализ эксплуатационных характеристик вариантов адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / Шишкарев М. П. Угленко А.Ю. // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 8. – С. 44–48.
2. Шишкарев, М. П. Аналитическое обоснование оптимального способа настройки предохранительных фрикционных муфт / М.П. Шишкарев // Вестник машиностроения. – 2009. – № 9. – С. 3–6.

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

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

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

8. Шишкарёв, М. П.. Выбор формы нагрузочной характеристики первого конструктивного варианта адаптивной фрикционной муфты с отдельным силовым замыканием / М.П. Шишкарёв, А. А. Луцкич // 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 твердых тел 2-го поколения / М. П. Шишкарёв // 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. 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.

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

12. 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.

Поступила в редколлегию 26.02.2023 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

MODIFICATION METHODS WITH HIGH ENERGY THE IMPACTS OF MULTILAYER PLASMA COATINGS ON BASIS OF CERAMICS

The article discusses processing methods using highly concentrated energy flows that effectively affect the structure of multilayer plasma coatings with subsequent modification of the structure and without changing the operational properties of the base. is thermal, associated primarily with the thermalization of the kinetic energy of the particles and contributing to the heating of the resulting near-surface layer. Even despite the high melting temperatures of the materials of the coatings under study, high-energy treatment ensures their melting with the formation of a melt above their melting temperature. The high temperature gradient that arises in the molten layer of the formed coating, accompanied by the mechanical effects of flows on the melt surface and the pressure of the shock-compressed layer, as well as the development of a number of hydrodynamic instabilities at the phase boundaries, contributes to the mixing of the resulting molten layer, which in its turn turn and contributes to the homogenization of the elemental composition. High temperatures in the melt also lead to partial evaporation of the atoms of the processed material, as a result, the ratio of oxygen and metal in the resulting coating changes slightly.

Keywords: ceramic-metal plasma coatings, high-energy flows, treatment distance, molded structures, surface layers, compression plasma, laser treatment

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

СПОСОБЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КЕРАМИКИ

В статье рассмотрены способы обработки при помощи высококонцентрированных потоков энергии, которые эффективно воздействуют на структуру многослойных плазменных покрытий с последующей модификацией структуры и без изменения эксплуатационных свойств основы.

Одним из самых основных эффектов при воздействии высококонцентрированных потоков энергии на обрабатываемую поверхность покрытий является тепловой, связанный в первую очередь с термолизацией кинетической энергии у частиц и способствующий нагреву полученного приповерхностного слоя. Даже несмотря на высокие температуры плавления материалов исследуемых покрытий при высокоэнергетической обработке обеспечивается их плавление с формированием расплава выше температуры их плавления. Возникающий при этом в расплавленном слое сформированного покрытия высокий градиент температур, сопровождающийся механическими воздействиями потоков на поверхности расплава и давлением ударно-сжатого слоя, а также развитием целого ряда гидродинамических неустойчивостей на границах фаз, способствует перемешиванию полученного расплавленного слоя, что в свою очередь и способствует гомогенизации элементного состава. Высокие температуры в расплаве также приводят к частичному испарению атомов обрабатываемого материала, в результате незначительно меняются соотношения кислорода и металла в получаемом покрытии.

Ключевые слова: металлокерамические плазменные покрытия, высокоэнергетические потоки, дистанция обработки, сформованные структуры, поверхностные слои, компрессионная плазма, обработка лазером.

1. Introduction. Plasma wear-resistant powder coatings are widely used in modern technology. The use of high temperatures and energy densities allows coatings of refractory materials that are difficult to melt with other traditional thermal spray processes. In addition, the effective use of wear-resistant coatings can be significantly improved by applying a subsequent modifying effect on their structure. When processing wear-resistant plasma coatings with high-energy effects, their sources have a number of advantages: firstly, locality and a high concentration of input energy, which makes it possible to act on the necessary area of the formed wear-resistant coating, thereby not disturbing, due to the general heating of its entire volume, microstructure and required properties; secondly, the possibility of strict control of all the parameters of the impacts, which make it possible to form the structure of the created layer, regulate its roughness and the necessary geometric dimensions, and obtain the necessary parameters of wear resistance, total porosity, and hardness [1-5]. 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.

2. Methods for modifying multilayer plasma coatings by high-energy effects.

The main methods of effectively influencing the structure of plasma coatings with subsequent modification of the structure and without changing the operational properties of the base are their processing using highly concentrated energy flows. The main types of such subsequent processing of coatings include: melting of the formed coatings using a plasma installation; treatment with short-term pulses of compression plasma; subsequent reflow using laser beam radiation [6-8]. After the plasma reflow process, the formed coatings significantly increase the size of the main phase of the resulting solid solution, which leads to a decrease in microhardness. At the same time, porosity also decreases, and macrohardness increases accordingly. All of the above factors (a decrease in total porosity with a corresponding activation of diffusion processes) during plasma treatment lead to a fairly dense coating with high characteristics of both cohesive and adhesive strength. But the main drawback of this technology is the presence of a zone of thermal influence on the corresponding base metal of the product, which is why massive and overall coatings are subjected to the process of melting [9]. The disadvantage mentioned above is not observed when the formed plasma coatings are processed by the action of pulses of a compression plasma jet. Usually, plasma injectors equipped with a coaxial system of electrodes serve as sources of pulsed flows under such influences. It was this treatment that was carried out on the formed surface of the HSC (heat-shielding coating) (Ni-Cr-Al-Y-ZrO₂ - 8% Y₂O₃) on the parts of gas turbine blades [10]. In this process, nitrogen was used as a plasma-forming gas; the forged heat flux is not able to propagate in depth to a very large value. And therefore, from the surface, the resulting plasma coating structure has the form of a molten layer with a thickness of about 10 microns. The transformed layer formed after exposure is evenly distributed on the surface and, accordingly, clogs the pore outlets. The conditions obtained under the influence of pulses of a compression jet, which is a high-speed thermal shock with further instantaneous cooling over the entire surface of the resulting coating, largely form thermal stresses and lead to the corresponding fragmentation of the surface. That is why plasma coatings with very low thermal conductivity, such as, for example, oxide HSC, become much more efficient and workable under high-temperature conditions. In the process of thermal cycling of a number of parts (as a rule, parts of aircraft engines, such as gas turbine blades, combustion chambers, nozzles) [11-14], they

are deformed, but without destruction due to general fragmentation and the resulting closure of pore exits, which significantly reduces the gas permeability of the resulting coating. All this makes it possible to perform layer-by-layer processing of sprayed coatings containing formed pores with their gradual melting over the entire thickness due to an increase in the thermal conductivity of the previous treated layers and overheating of the still untreated subsequent deep layers [15]. This leads to a significant increase in the efficiency of the most used HSC. A structure of surface layers with increased heat resistance and coating layers bordering the substrate with high operational characteristics of cohesion and adhesion is formed. The sources [10] considered the effect of exposure to compression plasma flows on the combinatorics of plasma coatings consisting of many layers (sublayers (Ni-Al, Ni-Cr) and outer layers of oxides (Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2) formed on thin substrates of aluminum. Conducted high-energy impacts modify the near-surface layer. The analysis of the elemental and phase composition of ceramic coatings was carried out, their microstructure and mechanical characteristics were considered, which made it possible to establish the regularities of the effect of compression plasma on such types of coatings. One of the most basic effects when a compressive plasma flow acts on the treated surface of coatings is thermal, which is associated primarily with the thermalization of the kinetic energy of plasma particles and contributes to heating the resulting near-surface layer. Even despite the high melting temperatures of the materials of the coatings under study: 2715 C - (ZrO_2), 2072 C - (Al_2O_3), 1843 C - (TiO_2) - when heated by a compression plasma flow, their melting is ensured with the formation of a melt above their melting temperature. The high temperature gradient (~ 105 K/m) arising in this case in the molten layer of the formed coating, accompanied by the mechanical effects of the plasma flow on the melt surfaces and the pressure of the shock-compressed layer, as well as the development of a number of hydrodynamic instabilities at the phase boundaries, contributes to mixing of the resulting molten layer, which in turn contributes to the homogenization of the elemental composition. High temperatures in the melt also lead to partial evaporation of the atoms of the processed material, as a result, the ratio of oxygen and metal in the resulting coating changes slightly. Nevertheless, it does not lead to a violation in the stoichiometry of the compositions of the modified ceramic oxide phases. According to the equilibrium diagrams of the state of binary systems, Zr-O, Al-O and Ti-O, zirconium oxide ZrO_2 has a fairly wide region of homogeneity, which begins at oxygen concentrations of about 40% atomic fractions, while Al_2O_3 and TiO_2 oxides can exist in narrower concentration ranges. Therefore, the use of coatings based on zirconium oxides ZrO_2 are more preferable due to the preservation of the oxide modification of the surface layer even after the use of compression plasma flows, not excluding repeated exposures leading to a change in the ratio of metal and oxygen atoms. Partial evaporation of atoms from the formed melt and hydrodynamic mixing of the resulting molten layer contribute to a decrease in the concentration of impurity atoms found in coatings during investigation. The formed surfaces of coatings based on oxides are characterized by increased roughness, this is due to the sintering of individual particles of powder material during the formation of plasma coatings (Figure 1 a). After high-energy exposure to compressive plasma flows, intense hydrodynamic mixing of the melts occurs, which, due to the surface tension forces, smoothes the surfaces after crystallization (Figure 1 b). At the same time, the high cooling rate of the melt, due to intense heat removal to the unmelted part of the samples, leads to rapid crystallization of the melt, as a result, the crystallized solid phase has a high level of mechanical stresses, which leads to the appearance of a network of surface cracks. The number of cracks, as well as their spatial localization, as well as their average size, do not depend on the type of plasma coating being processed. An analysis of the microstructure of the coatings formed after exposure to compression plasma was carried out. He

showed that the depth near the molten layer is on the order of 6–10 μm for plasma coatings based on aluminum oxide (Al_2O_3) powder material, and on the order of 10–15 μm for coatings based on zirconium oxide (ZrO_2). The increase in the depth of the molten layer of coatings based on ZrO_2 is due to its lower thermal conductivity (3–5 W/m K) in comparison with Al_2O_3 (40 W/m K). For coatings based on aluminum oxide powder material, the heat flux is more intensively removed to the unmelted volume and, accordingly, contributes less to heating in the near-surface region. The crystallized layer of the formed coating is characterized by the almost absence of pores, as well as longitudinal cracks, which are usually present in the coating after formation, it turns out that as a result of the impact of the compression plasma flow, a significant compaction of the near-surface layer occurs. It should be noted that the intermediate layer based on nickel-aluminum and nickel-chromium powder materials does not change its composition and thickness even after exposure to a compression plasma flow.

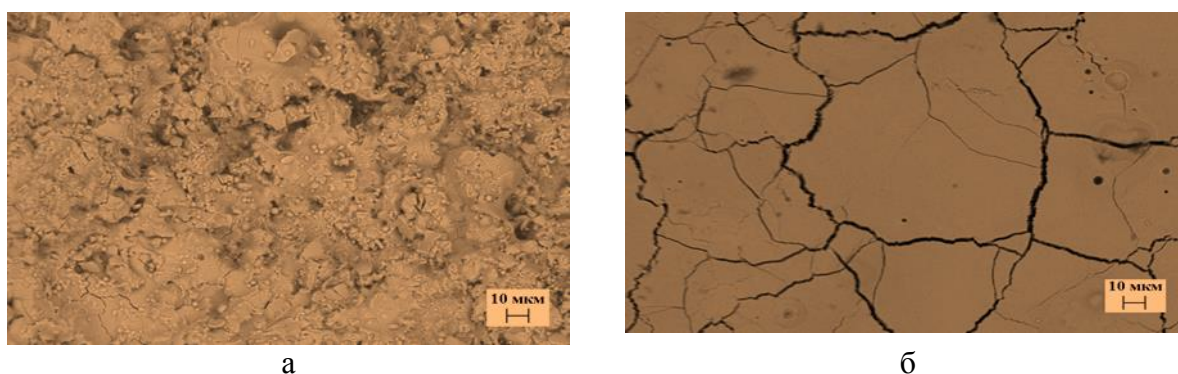


Figure 1. Areas of the surface of the coatings: a - before and b - after processing compression plasma (magnification $\times 1000$)

This is due to the fact that the thickness of the outer oxide layer is approximately several hundred micrometers, due to which the thermal effect when exposed to the plasma flow on the sublayer is negligible. In the practical use of multilayer composite plasma coatings, coatings based on M rabbits (Ni-Cr-Y-Al) are optimal, since this sublayer contains elements of both the oxide layer (yttrium) and substrate elements (aluminum). In this case, the conjugation of the sublayer with the oxide layer and the substrate leads to an increase in the required adhesion strength and prevents the layers from peeling off under external influence. While maintaining the elemental composition within the required homogeneity of the existence of oxide phases, it stabilizes the phase composition of plasma coatings after exposure to compression plasma flows. In the case of plasma coatings based on ZrO_2 , in which two modifications (monoclinic and cubic) are simultaneously present in the initial state, the volume content of the monoclinic modification decreases. This contributes to an increase in the wear resistance of the coating itself due to the homogeneity of the phase composition and a decrease in the level of internal stresses at the phase boundaries. Changes in the structure in the near-surface layer of the formed coatings after exposure to compression plasma flows also contribute to the modification of their mechanical properties. Smoothing the surface, increasing the density of the crystallized layer and the absence of pores and macrocracks makes it possible to improve the mechanical properties of the surface, as evidenced by the decrease in the friction coefficient. The presence of surface cracks in the remelted layer (Figure 71 b) negatively affects the change in the friction coefficient, leads to its increase. They can be initiators of internal stresses, which can lead to the destruction of the formed coatings and an increase in the intensity of abrasive wear. Such destruction during tribological testing of the surface can occur

when modifying coatings based on Al_2O_3 , for which an increase in the friction coefficient was recorded. For coatings based on ZrO_2 , a hardened layer based on zirconium nitride (ZrN) is formed on the surface. They are characterized by a decrease in the coefficient of friction after treatment using compression plasma. X-ray spectral microanalysis from the surface provides the following data on the percentage in atomic fractions of elements in the near-surface layer - 56.1% O2 and 27.3% Zr, 9.3% Y; 2.4% N. The presence of nitrogen is explained by the introduction of a plasma-forming substance into the near-surface layer. The ratio of elements under the influence of compression plasma changes and this is caused by partial evaporation of oxygen atoms with a decrease in concentration. High-energy treatment forms a surface relief characteristic of a remelted or crystallized layer with an extensive network of microcracks (from 20 to 80 μm) and a fine-mesh substructure (average cell size at the level of 200–400 nm) due to rapid crystallization near the melt and the creation of thermoelastic stresses in top layers of the coating. In sources [11- 13], for high-energy processing of TRC based on partially stabilized zirconia, CO_2 lasers were used: repetitively pulsed (pulse energy density from 90 to 250 J/cm^2 , wavelength 9.25 μm) and continuous operation (power 800 W, wavelength 10.6 μm , spot diameters 4; 5 and 7 mm). After processing using a pulsed CO_2 laser, almost 100% of the tetragonal modification is formed in the plasma coating, there is no monoclinic modification of ZrO_2 .

Rapid cooling as a result of laser processing equalizes the concentrations of yttrium oxide in the coating volume and starts the suppression of diffusion processes, this redistributes yttrium oxide and forms the complex oxide $\text{Y}_{0.15}\text{Zr}_{0.85}\text{O}_{1.93}$. In the heat-affected zone, 3 regions are formed, which is associated with a decrease in the cooling rate of the material with distance from the surface due to insufficient thermal conductivity of zirconium dioxide. The thinnest, microcrystalline, amorphous structure of tetragonal zirconium dioxide formed directly at the very surface. In the center of the zone, thin dendrites are distinguished, approximately 0.01 μm in size and up to 0.05 μm in length, while the layer thickness is approximately 2-3 μm . Further, a larger and more pronounced crystalline structure is observed with rather large grains of tetragonal gray zirconium dioxide (0.05-0.1 μm) and thin light grains (0.008-0.016 μm) of the complex oxide $\text{Y}_{0.15}\text{Zr}_{0.85}\text{O}_{0.93}$. The formation of complex oxides is explained by the redistribution (segregation) of the stabilizer occurring in this area and by the fact that, during crystallization, its excess is displaced from the outer region into this zone. The approximate thickness of this layer is about 3-4 microns. In the region of the largest value, tetragonal zirconium dioxide (about 10-20 μm) has two modifications: large inclusions (modifications 17-923 about 0.1-0.2 μm) and small inclusions (modifications 14-534 less than 0.01 μm). When a cw CO_2 laser is used for modification, the main regularities are preserved when the structure of the formed coating changes. However, the heat-affected zones (HAZ) have a much greater depth and the formed cracks propagate not only through the HAZ, but also further into the treated coating. The resulting structure of the transformed layer during high-energy processing with a pulsed CO_2 laser is preferable for the appointment of heat-protective coatings. This was shown by the results of thermal cycling, in HSC treated with a pulsed laser, the number of thermal cycles is 1.5 times more (483) than in coatings without treatment, and 1.4 times higher than in coatings treated with a continuous CO_2 laser. In [10–13], Al_2O_3 – TiO_2 coatings obtained by plasma spraying onto a carbon steel substrate were treated with a laser, and the effect of laser remelting on the microstructure and wear resistance of plasma sprayed Al_2O_3 – TiO_2 coatings was studied. The powder sublayer consists of 80 wt.% Ni - 20 wt. % Cr, the main parameters of plasma deposition are as follows: current - 500 A, voltage - 68 V, Ar primary gas - 40 l / min, He secondary gas - 20 l / min, spray distance - 120 mm, and spray thickness - about 50 microns. The surface ceramic coating powder consists of 60 wt.%

Al_2O_3 and 40 wt.% TiO_2 , the main parameters of plasma spraying are as follows: current - 585 A, voltage - 70.6 V, primary Ar - 40 l/min, secondary He - 20 l/min, spray distance - 120 mm, spray thickness - 300-400 microns. Laser remelting was carried out with a high-energy pulsed laser (type HAN'S-LASER YAG W200B) with a spot diameter of 4 mm, a single-pulse power of 8 kW, and a scanning speed of 8 mm/s. The microstructure and phase composition of plasma-sprayed and laser-remelted coatings were analyzed using scanning selective microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), and X-ray diffraction (XRD). The microhardness and adhesive strength of the two coatings were measured using a microhardness tester and an electronic universal tensile testing machine. The wear resistance of the two coatings was tested using a slurry rubber wheel abrasion tester, and the wear behavior was also studied by SEM. to the right, the bonding layer and the ceramic coating are alternately located. The coating has a typical plasma-sprayed lamellar structure and contains many pores and cracks (Figure 2 a). Laser remelting makes it possible to effectively reduce the pores and microcracks of the plasma-sprayed coating, and the coating itself has become much denser. In addition, lamellar defects of the plasma-sprayed coating were erased and fine equiaxed grains with a uniform distribution were obtained (Figure 2 b). Thus, the compactness of the plasma-sprayed coating has been greatly improved by laser remelting. The plasma-sprayed coating has a porous microstructure and a microhardness value in the range from 460 to 630 HB (Figure 2 a). The laser remelted coating has a dense microstructure and a microhardness value in the range from 980 to 1000 HB (Figure 2b). Obviously, laser remelting leads to a significant increase in microhardness (more than 50%) and a homogeneous dense microstructure (very uniform microhardness).

X-ray diffraction analysis was carried out on the plasma-sputtered coating and the laser-remelted coating. The microstructure of the plasma-sprayed coating mainly consists of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ and TiAl_2O_5 , while the laser remelt coating consists only of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ and TiAl_2O_5 . Obviously, the metastable $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase transforms into the stable $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase due to remelting and recrystallization of the plasma-sprayed coating during laser remelting. Therefore, it is possible to increase the hardness and wear resistance of the coating using laser remelting. The laser remelted coating becomes much denser, and then its microhardness and adhesive strength are greatly improved. Laser remelted coating has better wear resistance compared to plasma sprayed coating, and the main wear mechanism responsible for wear is wear of micro-cracks and cracks.

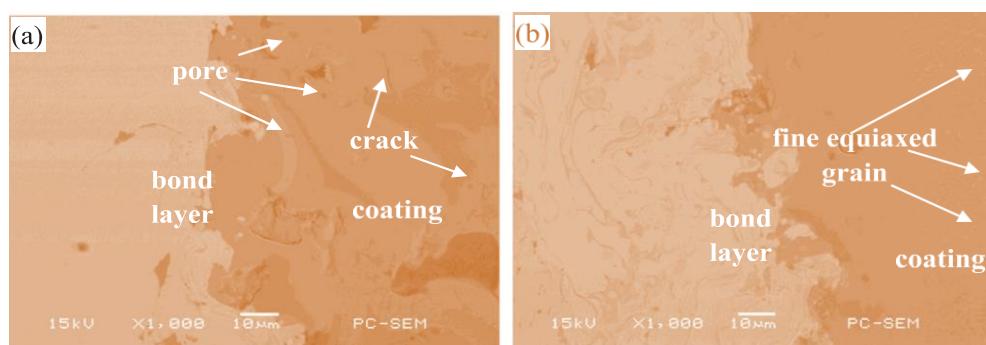


Figure 2 - Cross section of SEM images of coatings: (a) plasma spraying; (b) laser remelting

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. Our studies allowed us to state that when the resulting wear-resistant plasma coatings are exposed to compression plasma flows, the following processes take place. The high amount of energy transferred by the plasma flow to the coating contributes to the melting of the surface layer with a thickness of 10–70 μm , depending on the coating material being processed. When exposed to a plasma flow, a certain part of the coating material can be removed due to the ablation effect. Moreover, the amount of material removed will increase with an increase in the energy transferred to the coating by the plasma flow. Under the influence of the pressure of the plasma flow, liquid-phase mixing will occur in the molten coating layer. At the last stage, the surface layer of the coating hardens under conditions of ultrafast cooling. It turns out that the phase and elemental composition of the surface layer of the coating changes significantly. A layer is formed in the coating, which contains elements of the coating and plasma-forming gas. And in the case of multi-stage processing of the "coating-base" system, a layer is formed that contains elements and coatings, and bases and plasma-forming gas.

LITERATURE:

1. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity [et al.] // High Temperature Material Processes, 2014. – No. 18. – P. 45–62.
2. Okovity, V. A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V. A. Okovity, A. F. Panteleenko // Processing of metals. - Novosibirsk, 2015. – No. 67. – P. 46-54.
3. Okovity, V. A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V. A. Okovity [et al.] // Science and Technology BNTU. – Minsk. – 2018. – Issue 3. – P. 183-189.
4. Obtaining and research of screen anti-meteor protection elements based on multi-layer composite plasma coatings NiAl-Al₂O₃ / V.M. Astashinsky [et al.] // 15th Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Proceedings of the International Forum, Minsk, May 23-26, 2016 / ITMO; editor: O.G. Penyazkov. – Minsk, 2016. – P. 40-44.
5. Technological features of the formation of heat-shielding coatings based on zirconium dioxide / V.V. Okovity [i dr.]. // Science and technology, BNTU. – 2016. – Issue. 3. – P. 193-199.
6. Formation and study of multilayer composite oxide plasma coatings on the elements of screen anti-meteor protection / V. A. Okovity [and others] // Science and technology, BNTU. – 2016. – Issue. 4. – P. 270-276.
7. Development of technology for applying plasma composite coatings based on zirconium dioxide for spacecraft systems / F. I. Panteleenko [et al.] // Science and technology, BNTU. – Minsk, 2015. – Issue. 3. – P. 5-9.
8. Liang Zhou. Microwave dielectric properties of low-energy plasma-coated NiCrAlY / Al₂O₃ composite / Liang Zhou Wancheng Zhou, Fa Luo, Jinbu Su, Dongmei Zhu, Yanli // Dong Surf. Coat. Technol. – 2015. – P. 69-85.

9. Bolelli, G. Thermal protective properties of the gradient ceramic coating NiCrAlY / Al₂O₃ are made by plasma spraying and spraying of a suspension / G.Bolelli, A. Candeli // *Wear* 344-345. – 2015. – P. 69–85.

10. 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.

11. Formation of plasma powder coatings from ceramics with subsequent high-energy modification to improve the operational characteristics of the surface / F.I. Panteleenko [et al.] // *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.

12. Okovity, V. A. Multilayer composite oxide plasma coatings on screen protection elements based on zirconium dioxide. / Okovity V. A., Pan-teleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., S.B. Sobolevsky S. B. // *"Science and technology"*, BNTU – Minsk. – 2017. – Issue 5. – P. 422-4311.

13. Okovity, V. A. Formation and study of plasma two-layer composite coatings (viscous NiCr metal layer and solid ZrO₂) / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Khramtsov P. P., Chernik M. Yu., Uglov V. V., S.B. Sobolevsky S. B. // *"Science and technology"*, BNTU – Minsk. – 2018. – Issue. 1. – P. 21-28.

Received by the editors 25.02.2023

СОДЕРЖАНИЕ

Бахадиров Г.А., Рахимова З.А. ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ ВЛИЯЮЩИХ НА РАЦИОНАЛЬНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ОПОРНЫХ ПЛИТ МЕЖДУ ПАРАМИ ВАЛОВ	3
Брешев В. Е. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОШПИНДЕЛЯ НА РЕГУЛИРУЕМЫХ КОНИЧЕСКИХ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ	9
Горобец И. А., Жарких Д. С., Киселица Д. О. ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ 3D-ПРИНТЕРА ПОВЫШЕННОГО ОБЪЕМА ПЕЧАТИ	19
Заплетников И. Н., Севаторова И. С., Гордиенко А. В. КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗБИВАЛЬНЫХ МАШИН НА ПОКАЗАТЕЛИ ИХ КАЧЕСТВА	26
Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров Б. С., Котляров С. Б. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КИНЕМАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАКАТКИ ОРЕБРЕНИЯ МЕДНЫХ ТРУБ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ	34
Михайлов Д. А., Витренко В. А., Михайлов А. Н., Михайлов В. А., Шейко Е. А. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ ВЕРТОЛЕТНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ	44
Шишкарев М.П. ПРИЧИНЫ НИЗКОЙ ТОЧНОСТИ СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ ПЕРВОГО ПОКОЛЕНИЯ	57
Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Volodko A. S., Sidorov V. A., Okovity V. V., Litvinko A. A., Astashinsky V. M. MODIFICATION METHODS WITH HIGH ENERGY THE IMPACTS OF MULTILAYER PLASMA COATINGS ON BASIS OF CERAMICS	64

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Astashinsky V. M.	64
Devoino O. G.	64
Litvinko A. A.	64
Okovity V. A.	64
Okovity V. V.	64
Panteleenko F. I.	64
Sidorov V. A.	64
Volodko A. S.	64
Sereda V. Yu.	64
Бахадиров Г. А.	3
Брешев В. Е.	9
Витренко В. А.	44
Гордиенко А.В.	26
Горобец И. А.	19
Жарких Д. С.	19
Заплетников И.Н.	26
Киселица Д. О.	19
Котляров Б.С.	34
Котляров В.Б.	34
Котляров С.Б.	34
Михайлов А. Н.	34, 44
Михайлов В. А.	44
Михайлов Д. А.	44
Рахимова З. А.	3
Севаторова И.С.	26
Шейко Е. А.	44
Шишкарев М. П.	57

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

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

(пустая строка - 12 pt)

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

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И
СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Выпуск 3 (82)' 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.