

Вып. 1(68)'2020 **ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

**ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Международный
сборник научных трудов**

Выпуск 1 (68)' 2020



ДОНЕЦК - 2020

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДНР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Международный сборник научных трудов

Основан в декабре 1994 года

Выходит 4 раза в год

Выпуск 1 (68)' 2020

Донецк – 2020

УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 1 от 28 февраля 2020 г.)

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

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

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

Издается при содействии **Международного союза машиностроителей**

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

Адрес редакции: ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, кафедра ТМ. Тел.: +38 062 301-08-40, E-mail: tm@fimm.donntu.org, Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

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

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

ISSN 2073-3216

ISSN 2518-7120 (E)

© Авторы статей, 2020
© ГОУВПО «ДОННТУ», 2020

УДК 621.923

Н. В. Азарова, канд. техн. наук, доц., **В. П. Цокур**, канд. техн. наук, доц.
Донецкий национальный технический университет, ДНР
Тел./Факс: +38(062) 3010807; E-mail: mc@meth.dgtu.donetsk.ua

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО КРУГА В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ

Определены параметры распределений разновысотности зерен, расстояния между ними и величины выступания зерен из связки на рабочей поверхности алмазного круга 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80-4-M2-01 и показан характер их изменения за 30 минут плоского шлифования быстрорежущей стали Р6М5Ф3.

Ключевые слова: шлифовальный круг, алмазные зерна, связка.

N. V Azarova., V. P. Tsokur

CHANGE PARAMETERS OF DIAMOND WHEEL WORKING SURFACE IN THE GRINDING PROCESS

The parameters of distribution law of the grain height difference, the distances between them and the height of grains above bind on diamond wheel working surface are determined and the character of their change in 30 minutes of flat grinding of high-speed steel is shown.

Keywords: grinding wheel, diamond grains, bind.

1. Введение

Применение алмазных кругов на металлической связке, которая прочно удерживает зерна в алмазоносном слое, позволяет повысить производительность и снизить себестоимость обработки за счет изменения глубины резания и подачи и снижения удельного расхода алмазов при принятых режимах резания.

Параметры рабочей поверхности круга (РПК), к числу которых относятся количество режущих зерен, расстояние между ними, разновысотность зерен и величина выступания зерен из связки, являются основой для определения формы и размеров среза, шероховатости обработанной поверхности, назначения оптимальных режимов обработки. При шлифовании в результате взаимодействия алмазных зерен с обрабатываемым материалом происходят изменения параметров рабочей поверхности алмазного круга [1, 2], которые необходимо учитывать при моделировании процесса и прогнозировании выходных технологических показателей шлифования, что является актуальной задачей.

Целью работы является исследование влияния процесса шлифования на изменение разновысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна, расстояния между зернами и величины выступания зерен из связки на РПК.

2. Основное содержание и результаты работы

Исследовали параметры распределений разновысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна, расстояния между зернами и величины выступания зерен из связки рабочей поверхности круга 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80-4-M2-01 после электроэрозионной правки и после 30 минут плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 методом профилографирования с последующей записью данных на ПЭВМ по разработанной нами методике [3] на измерительном комплексе, который позволяет регистрировать рельеф зерен и связки с точностью до 0,001 мм.

Правку осуществляли в рабочей зоне на рабочей скорости круга бруском из меди М1 длиной 30 мм с ручной поперечной подачей и вертикальной подачей 0,002...0,007 мм/ход, средняя сила тока 5...8 А при напряжении холостого хода 50 В,

Эксперименты проводили на станке модели 3Д711Ф11, скорость круга 30 м/с, скорость стола 6 м/мин, глубина шлифования 0,015 мм.

Формирование выборок выполняли на ПЭВМ по двум профилограммам рабочей поверхности, записанным в направлении, перпендикулярном оси круга, со смещением трасс профилографирования вдоль оси круга. Затем определяли статистические характеристики выборок и подбирали теоретические законы, описывающие распределения исследуемых параметров РПК [3].

Принадлежность выборок объемом n_1 и n_2 одной генеральной совокупности проверяли путем сравнения выборочных средних \bar{x}_1 , \bar{x}_2 и дисперсий s_1^2 , s_2^2 выборок. Выборки считали однородными, если подтверждались гипотезы о равенстве выборочных средних и дисперсий выборок.

Для проверки гипотезы о равенстве средних значений \bar{x}_1 , \bar{x}_2 находили экспериментальное значение критерия $t_{эксн} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}}$. По заданному уровню значимости $\alpha=0,05$ и числу степеней свободы $f=n_1+n_2-2=200+200-2=398$ определяли критическую точку $t_{кр}(\alpha, f)$ из таблицы критических точек распределения Стьюдента. Гипотеза о равенстве выборочных средних подтверждалась, если $t_{эксн} < t_{кр}$. Для проверки гипотезы о равенстве выборочных дисперсий s_1^2 , s_2^2 находили отношение большей выборочной дисперсии к меньшей $F_{эксн} = s_1^2 / s_2^2$. По таблице критических точек распределения Фишера-Снедекора по уровню значимости $\alpha=0,05$, числам степеней свободы $f_1=n_1-1=200-1=199$ и $f_2=n_2-1=200-1=199$ находили критическую точку $F_{кр}(\alpha, f_1, f_2)$. Гипотеза о равенстве выборочных дисперсий подтверждалась, если $F_{эксн} < F_{кр}$.

Результаты сравнения выборочных средних и выборочных дисперсий распределений разновысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна, расстояния между зернами и величины выступления зерен из связки на рабочей поверхности круга 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01, сформированной в процессе электроэрозионной правки и 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3, сведены в таблицу 1.

Как видно из таблицы 1, статистические характеристики выборок значений исследуемых параметров РПК, найденные для каждого из рассмотренных способов формирования РПК, по двум различным трассам отличаются незначимо. Выборочное среднее и выборочная дисперсия с достаточной полнотой характеризуют всю генеральную совокупность значений каждого из исследуемых параметров РПК.

Статистическая проверка законов распределения (нормального, экспоненциального, гамма-распределения, распределения Вейбулла и др.) по критерию согласия Пирсона [3] показала следующее.

Наиболее подходящим для описания всех возможных случаев закона распределения разновысотности зерен на РПК является двухпараметрическое распределение Вейбулла [4], которое имеет частные случаи, с право- и левосторонней асимметрией.

Распределения расстояний между зернами на рабочей поверхности алмазного шлифовального круга, сформированной указанными способами, могут быть описаны экспоненциальным законом [5].

Наиболее подходящим для описания закона распределения величины выступления зерен из связки на РПК является двухпараметрическое гамма-распределение [6], которое также используется для описания асимметрично распределенных величин.

Таблица 1. – Сравнение параметров рабочей поверхности круга 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01, сформированной различными способами

Параметры РПК	Способ формирования РПК	Трасса	Объем выборки	Выборочное среднее, мкм	Выборочная дисперсия, мкм ²	Критерий Фишера		Критерий Стьюдента	
						$F_{набл}$	$F_{кр}(\alpha=0,05)$	$t_{набл}$	$t_{кр}(\alpha=0,05)$
Разновысотность зерен	Электроэрозионная правка	1	200	37,62	257,14	1,04	1,64	1,25	1,26
		2	200	39,61	246,41				
	Плоское алмазное шлифование стали Р6М5Ф3	1	200	23,59	176,89	1,06		0,89	
		2	200	22,39	186,64				
Расстояние между зернами	Электроэрозионная правка	1	200	53,52	7435,67	1,05	1,64	0,21	1,26
		2	200	51,70	7072,15				
	Плоское алмазное шлифование стали Р6М5Ф3	1	200	194,60	39822,07	1,04		1,24	
		2	200	219,58	41581,39				
Выступление зерен из связки	Электроэрозионная правка	1	200	3,57	25,46	1,25	1,64	1,23	1,26
		2	200	2,98	20,44				
	Плоское алмазное шлифование стали Р6М5Ф3	1	200	2,00	10,51	1,03		0,19	
		2	200	2,40	10,86				

Построим графики плотности распределений разновысотности зерен, расстояния между зернами и величины выступления зерен из связки (рис. 1, а, б, в) с использованием параметров подобранных нами теоретических распределений [3-6]. Рассмотрим, как влияет процесс шлифования на исследуемые характеристики РПК.

Сравним распределения разновысотности зёрен после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования. Средняя разновысотность зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает среднюю разновысотность зерен после 30 мин плоского алмазного шлифования в 1,6 – 2,2 раза. Выборочная дисперсия распределения разновысотности зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает дисперсию после 30 мин плоского алмазного шлифования в 1,3 – 2,0 раза. График плотности вероятности распределения Вейбулла разновысотности зерен на РПК (см. рис. 1, а), сформированной электроэрозионной правкой симметричен, а график плотности распределения разновысотности зерен на РПК, сформированной в процессе плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 имеет явно выраженную правостороннюю асимметрию. В зоне больших разновысотностей наблюдается резкое уменьшение частот. Это может быть обусловлено механическим истиранием зерен алмаза в процессе шлифования, выпадением наиболее выступающих зерен, засалива-

нием субмикрорельефа контактных площадок зерен, а также межзеренного пространства продуктами обработки [1].

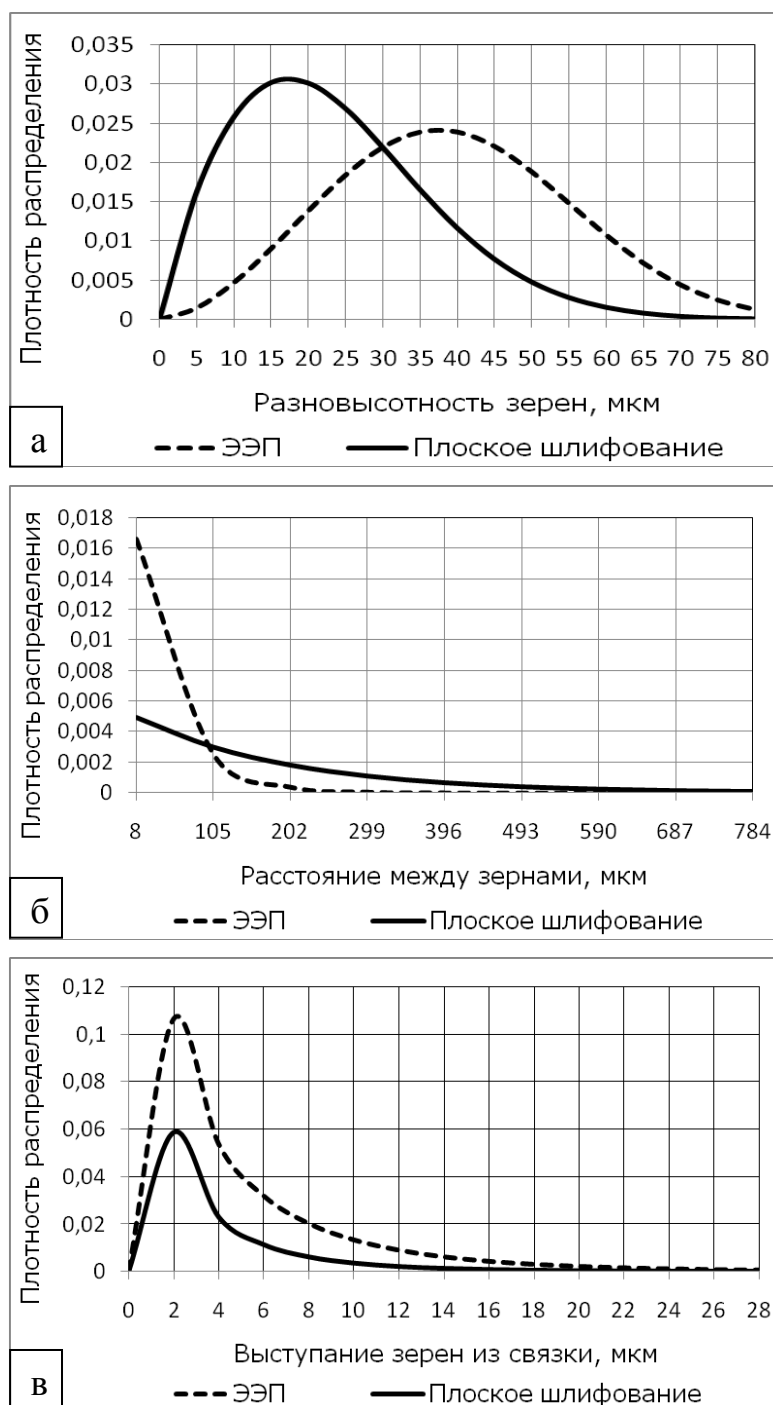


Рисунок 1. Плотность распределений разновысотности зерен (а), расстояний между зернами (б) и величины выступания зерен из связки (в) на рабочей поверхности круга 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80-4-M2-0, сформированной различными способами

Сравним распределения расстояний между зернами на РПК после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования. Графики плотности распределений расстояний между зернами (см. рис. 1, б), построенные с использовани-

ем параметров показательного распределения, показывают, что распределения расстояний между зернами на РПК после 30 мин плоского алмазного шлифования имеют большее математическое ожидание и дисперсию по сравнению с распределениями расстояний между зернами после электроэрозионной правки. Среднее расстояние между зернами (см. табл. 1) после 30 мин плоского алмазного шлифования превышает среднее расстояние между зернами после электроэрозионной правки в 3,5 – 4,2 раза. Выборочная дисперсия распределения расстояний между зернами (см. табл. 1) после 30 мин плоского алмазного шлифования превышает дисперсию после электроэрозионной правки в 4,2 – 5,9 раза. Это может быть обусловлено уменьшением числа режущих зерен в процессе шлифования [1].

Сравним распределения выступания зерен из связки после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования. Графики плотности распределений величины выступания зерен из связки (см. рис. 1, в), построенные с использованием параметров гамма-распределения, показывают, что величина выступания зерен из связки на РПК после электроэрозионной правки имеет сходное распределение с величиной выступания зерен из связки после шлифования (графики имеют явно выраженную правостороннюю асимметрию, в зоне больших величин наблюдается резкое уменьшение частот), однако распределения для электроэрозионной правки имеют большее математическое ожидание и дисперсию. Средняя высота выступания зерен из связки (см. табл. 1) после правки электроэрозионным способом превышает аналогичный параметр после шлифования в 1,2 – 1,8 раза. Выборочная дисперсия распределения величины выступания зерен из связки (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает дисперсию после шлифования в 1,9 – 2,4 раза. При этом максимальная высота выступания зерен из связки после электроэрозионной правки превышает аналогичный параметр после 30 мин плоского алмазного шлифования [1] в среднем в 1,6 раза (табл. 2).

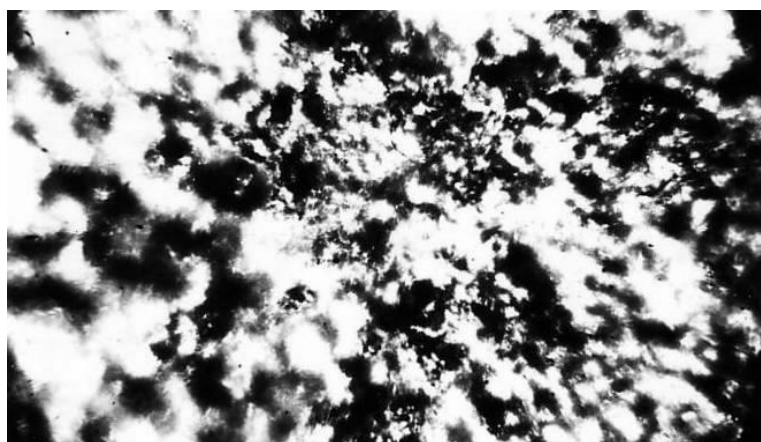
Таблица 2. – Максимальная высота выступания зерен из связки, мкм, на рабочей поверхности круга 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80-4-M2-01, сформированной различными способами

Способ формирования РПК		Трасса	Объем выборки	Максимальная высота выступания зерен из связки, мкм
Электро-эрозионная правка	ЭЭП 1	1	200	29,67
		2	200	27,37
	ЭЭП 2	1	200	27,83
		2	200	29,70
Плоское алмазное шлифование стали Р6М5Ф3		1	200	16,77
		2	200	18,04

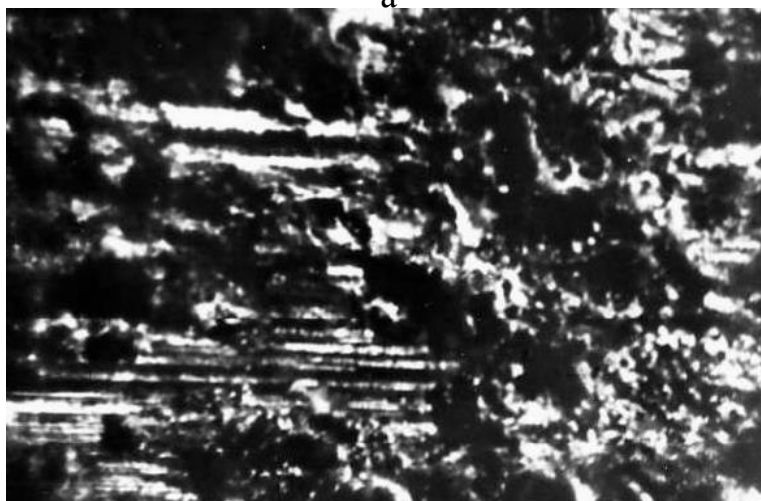
Это может быть связано с образованием на рабочей поверхности круга участков, где зерна не выступают над связкой, что происходит либо вследствие скалывания или вырывания зерен под действием сил резания, либо из-за заполнения шламом межзеренного пространства [1].

После электроэрозионной правки РПК представляет собой поверхность с развитым рельефом, сформированным выступающими из металлической связки алмазными зернами (рис. 2, а). В первые минуты шлифования стали Р6М5Ф3, твердость которой значительно выше твердости материала электрода, начинается интенсивное удаление и

скалывание острых вершин наиболее выступающих из связки зерен, в результате чего разновысотность и выступание зерен из связки уменьшаются. Наиболее слабо закрепленные зерна активно удаляются в течение первых 15 минут шлифования. В это же время на вершинах контактирующих зерен начинают образовываться площадки, субмикрорельеф которых заполняет обрабатываемый материал. При дальнейшей обработке контактные площадки увеличиваются в размерах, начинается образование площадок на других зернах, которые вследствие разновысотности вначале участия в обработке не принимали. Кроме того, наблюдается засаливание межзеренного пространства, которое увеличивается с увеличением времени обработки (рис. 2, б). Все это приводит к увеличению расстояний между контактирующими зернами. В результате происходит снижение работоспособности шлифовального круга, что может привести к снижению качества обработанной поверхности.



а



б

Рисунок 2. Рабочая поверхность круга 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80-4-М2-01 а) после ЭЭП; б) после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3

3. Заключение

Предложенная нами методика исследования РПК позволяет определить закон и параметры распределений разновысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна, расстояния между зернами, а также высоты выступания зерен из связки на рабочей поверхности алмазного шлифовального круга. Однако, предложенная нами ме-

тодика определения характеристик рабочей поверхности алмазного шлифовального круга требует значительных временных затрат на проведение экспериментальных исследований. Использование статистического имитационного моделирования позволяет значительно снизить трудоемкость исследований [7], необходимых для прогнозирования параметров шероховатости шлифованной поверхности.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Разновысотность зерен на рабочей поверхности круга 1A1 250×76×15×5 AC6 100/80-4-M2-01 после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 описывается распределением Вейбулла; расстояние между зернами – экспоненциальным распределением; величина выступания зерен из связки – гамма-распределением.

2. Числовые характеристики распределений разновысотности зерен, расстояний между зернами и величины выступания зерен из связки на РПК, сформированной электроэрозионной правкой и плоским алмазным шлифованием стали Р6М5Ф3 в течение 30 мин, различны. Так, после 30 мин плоского алмазного шлифования средняя разновысотность зерен уменьшается в 1,9 раза, среднее расстояние между зернами увеличивается в 3,8 раза, а средняя высота выступания зерен из связки уменьшается в 1,5 раза по сравнению с аналогичными параметрами после электроэрозионной правки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Новиков, Ф. В. Механика и производительность алмазного шлифования с учетом износа зерен круга / Ф.В. Новиков, Ю.Г. Гуцаленко, В.И. Полянский, В.В. Ивкин // Резание и инструменты в технологических системах. – Харьков, 2018. – Вып. 88. – С. 142-157.

2. Гусев, В. В. Оценка параметров рабочей поверхности алмазного шлифовального круга / В.В. Гусев, Д.А. Моисеев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – № 4 (59) – С. 11-17.

3. Азарова, Н. В. Применение статистических методов к исследованию рабочей поверхности шлифовального круга / Н. В. Азарова, А. Н. Маленко, В. П. Цокур // Сборник научно-методических работ. – Вып. 10. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 3-10.

4. Азарова, Н. В. Определение закона и параметров распределения разновысотности алмазных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга / Н. В. Азарова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 8 (190). – С. 78-87.

5. Азарова, Н. В. Определение закона и параметров распределения расстояний между зернами на рабочей поверхности алмазного шлифовального круга / Н. В. Азарова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – Вип. 9 (205). – С. 82-89.

6. Азарова, Н. В. Определение закона и параметров распределения величины выступания алмазных зерен из связки на рабочей поверхности шлифовального круга / Н. В. Азарова // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний збірник наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 42. – С. 3-10.

7. Азарова, Н. В. Имитационное моделирование параметров рабочей поверхности шлифовального круга / Н. В. Азарова, А. Н. Маленко // Сборник научно-методических работ. – Вып. 9. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – С. 11-15.

Поступила в редколлегию 21.01.2020 г.

УДК 622.61

Е. М. Арефьев, канд. техн. наук, доцент, **В. О. Гутаревич**, д-р техн. наук, доцент,
П. О. Забродченко, инженер

Донецкий национальный технический университет, ДНР

E-mail: elcross@mail.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЗАГРУЖЕННОСТИ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ВИБРООЧИСТКИ ЛЕНТЫ

Произведена оценка влияния переменной загрузки шахтного ленточного конвейера, на эффективную область применения вибрационных очистителей. Определены условия возможного использования виброочистителей на всем диапазоне рабочих натяжений шахтных конвейерных лент

Ключевые слова: ленточный конвейер, вибрационный очиститель, очистка ленты, натяжение ленты

E. M. Arefyev, V. O. Gutarevich, P. O. Zabrodchenko

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF VARIABLE LOADING OF BELT CONVEYORS ON THE PARAMETERS OF THE BELT VIBRATION CLEANING PROCESS

The influence of the variable loading of the mine belt conveyor on the effective field of application of vibration cleaners is evaluated. The conditions for the possible use of vibration cleaners on the entire range of working tension of mine conveyor belts are determined

Keywords: belt conveyor, vibration cleaner, belt cleaning, belt tension

Введение.

Повышение эффективности горнодобывающей отрасли невозможно без совершенствования ленточных конвейеров [1]. Очистка ленты от налипающей на нее горной массы является одной из важнейших операций при эксплуатации ленточных конвейеров на горных предприятиях. Некачественная очистка ленты вызывает: увеличение количества аварийных остановок конвейера, интенсивный износ ленты, загрязнение подконвейерного пространства просыпью транспортируемого груза. Среди всего разнообразия средств очистки шахтных конвейерных лент [2] наиболее перспективными являются виброочистители [3-5], которые обеспечивают: исключение износа рабочей обкладки конвейерной ленты, снижение коэффициента сопротивления движению ленты, сохранение неизменной во времени степени очистки и т. п. Широкое распространение виброочистителей ограничивается использованием упрощенных методик расчета, которые не учитывают в полной мере особенности рабочего процесса виброочистки и некоторые параметры, влияющие на эффективность работы.

Обоснованные области применения, особенности рабочих процессов и конструктивного исполнения вибрационных очистителей шахтных конвейерных лент наиболее полно изложены в [6-10]. Однако оценка влияния переменной загрузки шахтных конвейеров на параметры процесса виброочистки не исследовались и не публиковались.

Цель исследования. Провести оценку влияния переменной загрузки конвейера, на эффективную область применения вибрационных очистителей шахтных конвейерных лент.

Основное содержание и результаты. В соответствии с правилами безопасности [11] пуск конвейера должен производиться вхолостую, следовательно, перед остановкой конвейер должен разгрузиться.

Переходные режимы возникают при частичной или полной недогруженности конвейера и соответствуют значениям транспортируемого грузопотока от нулевого до расчетного. Натяжение ленты в месте очистки при недогруженности конвейера изменяется по отношению к номинальному: для конвейеров, работающих в двигательном режиме (уклонных, штрековых и некоторых бремсберговых) – уменьшается; для конвейеров, работающих в генераторном режиме (бремсберговых) увеличивается. В связи с этим, представляет интерес провести исследование влияния изменения натяжения ленты на качество ее очистки.

С использованием разработанной математической модели [12, 13] были проведены исследования влияния изменения натяжения ленты, вызванного переменной загруженностью конвейера, на параметры его работы.

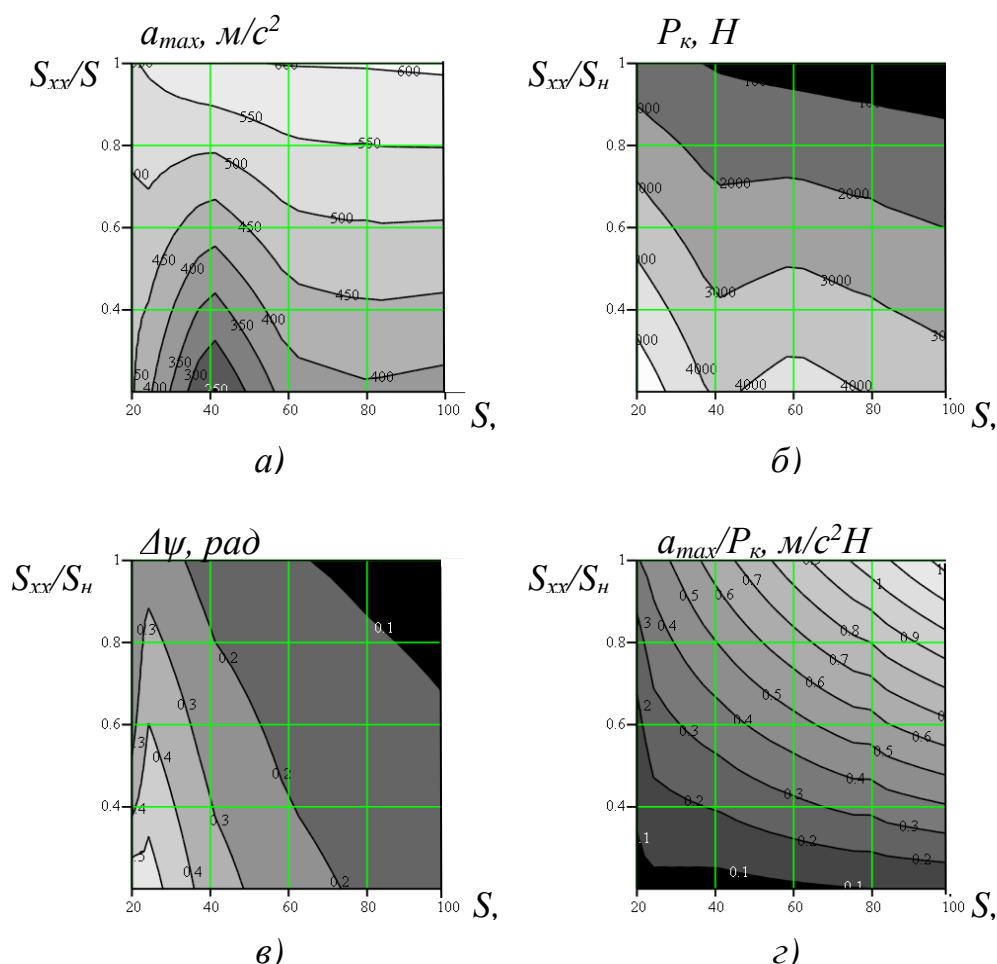


Рисунок 1. Зависимость виброускорения ленты a_{max} (а), контактной силы в ленте P_k (б), размаха колебаний рамы очистителя $\Delta\psi$ (в) и отношения виброускорения ленты к контактной силе a_{max}/P_k (г) от отношения натяжений ленты в режимах холостого хода и номинальном $S_{xx}/S_{ном}$ для различных номинальных натяжений ленты S для ленточного конвейера 2Л100У, работающего в двигательном режиме

На рис. 1 представлены зависимости виброускорения ленты (рис. 1, *a*), контактной силы в ленте (рис. 1, *б*), размаха колебаний рамы очистителя (рис. 1, *в*) и отношения виброускорения ленты к контактной силе (рис. 1, *г*) от отношения натяжений ленты в режимах холостого хода и номинальном для ленточного конвейера 2Л1100У, работающего в двигательном режиме.

Исследования проводились в диапазоне номинальных натяжений ленты от 20 до 100 кН при постоянном моменте магнитной силы 1760 Нм. Параметры очистителя настраивались на натяжение ленты, соответствующее ее номинальному натяжению. Для каждого номинального натяжения ленты диапазон натяжений холостого хода по отношению к номинальному составлял от 1 до 0,2.

Анализ зависимостей (рис. 1) показывает, что для уклонных конвейеров с малыми натяжениями (20 – 60 кН) изменение натяжения ленты в процессе работы более чем на 20%-50% приводит к существенному (на 25% и более) падению виброускорений ленты (рис. 1, *a*), что снижает качество очистки, а также к увеличению контактной силы в ленте до 3-х раз и более (рис. 1, *б*). Размах колебаний рамы очистителя увеличивается до 0,25 и более радиан (рис. 1, *в*), при этом, отношение виброускорения к контактной силе уменьшается до 0,1 – 0,2 м/с²Н (рис. 1, *г*).

Исследования проводились при постоянном моменте магнитной силы 1760 Нм, диапазон номинальных натяжений ленты составлял от 5 до 20 кН, диапазон натяжений холостого хода по отношению к номинальному составлял от 1 до 5.

Анализ зависимостей (рис. 2) показывает, что для бремсберговых конвейеров повышение натяжения ленты, вызванное разгрузкой конвейера, приводит к существенному увеличению как виброускорений (рис. 2, *a*), так и контактных сил в ленте (рис. 2, *б*). При этом контактные силы значительно превосходят силы, возникающие при работе виброочистителей на уклонных конвейерах (рис. 1, *б*). Размах колебаний рамы очистителя при увеличении натяжения в 2 раза и более составляет от 0,6 до 1,8 радиан (рис. 2, *в*).

На практике такие значения размаха колебаний рамы очистителя не могут быть реализованы в связи с ограниченностью пространства между грузовой и холостой ветвями конвейера в месте установки виброочистителя.

Отношение виброускорения к контактной силе при увеличении натяжения ленты в 2 и более раз составляет (0,09 ... 0,17) м/с²Н (рис. 2, *г*).

Таким образом, виброочистка конвейерных лент может быть рекомендована при натяжениях конвейерной ленты 60 кН и более. Однако, если натяжение ленты будет поддерживаться на постоянном уровне, то виброочистители можно использовать на всем диапазоне натяжений ленты.

Для исследования влияния изменения натяжения ленты в переходных режимах на рабочие режимы виброочистки получены зависимости виброускорений ленты, контактной силы и их отношения при изменении параметров: отношений текущего и номинального натяжений ленты в месте очистки - $S/S_{ном}$ и отношений частоты виброочистителя к его собственной частоте - $f/f_{0с}$.

Были рассмотрены два случая: первый - постоянный момент магнитной силы, 1760 Нм (для бремсбергового и уклонного конвейеров) (рис. 3); второй - при постоянной энергии удара (рис. 4), для бремсбергового конвейера – $6,3 \cdot 10^3$ Дж, для уклонного – 166 Дж.

С учетом того, что в режиме холостого хода натяжение ленты уклонного конвейера уменьшается, а бремсбергового – увеличивается, диапазон изменения натяжения

$S / S_{ном}$ для уклонного конвейера составлял от 1 до 0,05, а для бремсбергового от 1 до 20.

На рис. 2 представлены зависимости виброускорений ленты (рис. 2, а), контактной силы в ленте (рис. 2, б), размаха колебаний рамы очистителя (рис. 2, в) и отношения виброускорения ленты к контактной силе (рис. 2, г) от отношения натяжений ленты в режимах холостого хода и номинальном для бремсбергового ленточного конвейера 2Л1100У.

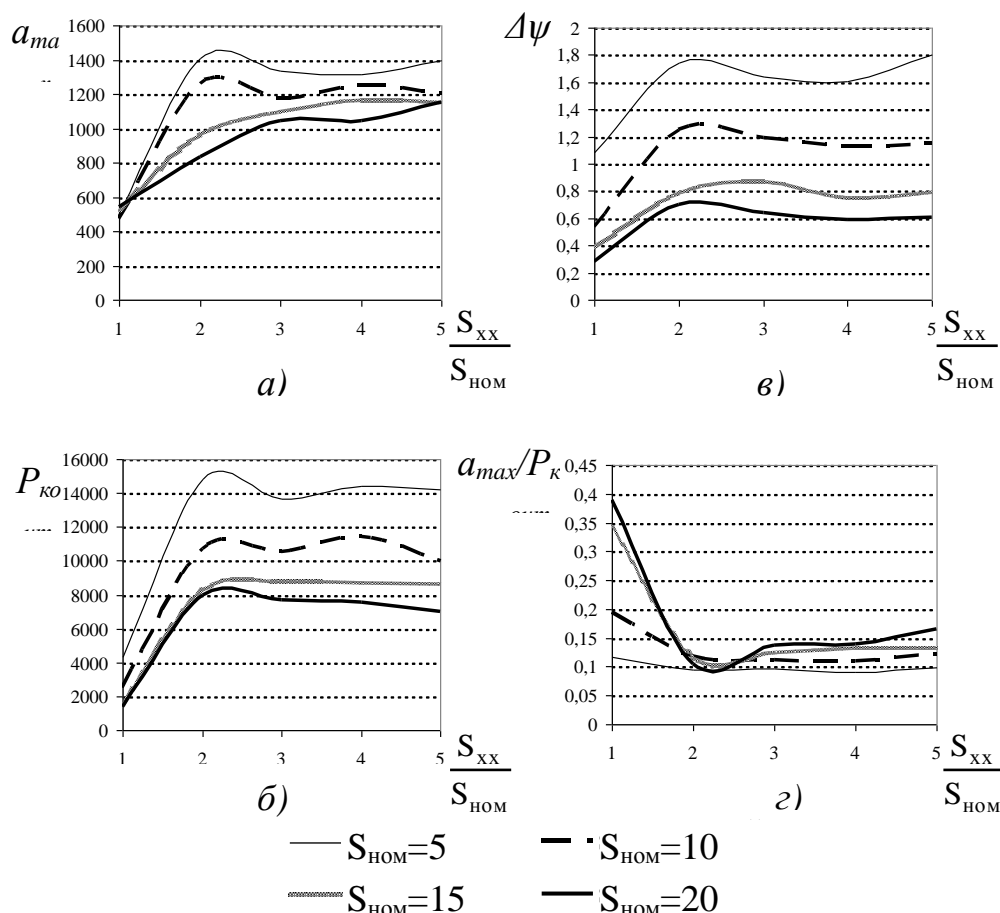


Рисунок 2. Зависимость виброускорения ленты a_{max} (а), контактной силы в ленте $P_к$ (б), размаха колебаний рамы очистителя $\Delta\psi$ (в) и отношения виброускорения ленты к контактной силе $a_{max}/P_к$ (г) от отношения натяжений ленты в режимах холостого хода и номинальном $S_{xx}/S_{ном}$ для бремсбергового конвейера 2Л1100У

При работе виброочистителя на собственной частоте ленты (пунктирная линия на всех графиках) достигается постоянное ускорение ленты практически на всем диапазоне изменения натяжения ленты как для уклонного (рис. 3, а), так и для бремсбергового (рис. 3, б) конвейеров.

Контактные усилия при этом минимальны для большинства значений натяжения ленты и составляют около 3000 Н (рис. 3, б). Эффективность изменения частоты возбуждения в соответствии с пунктирной линией четко иллюстрируется графиками отношения ускорения ленты к контактными силам. При этом, для бремсбергового конвейера

значения этого параметра достигают $0,25 \text{ м/с}^2\text{Н}$ (рис. 3, д), а для уклонного $1,1 \text{ м/с}^2\text{Н}$ (рис. 3, е).

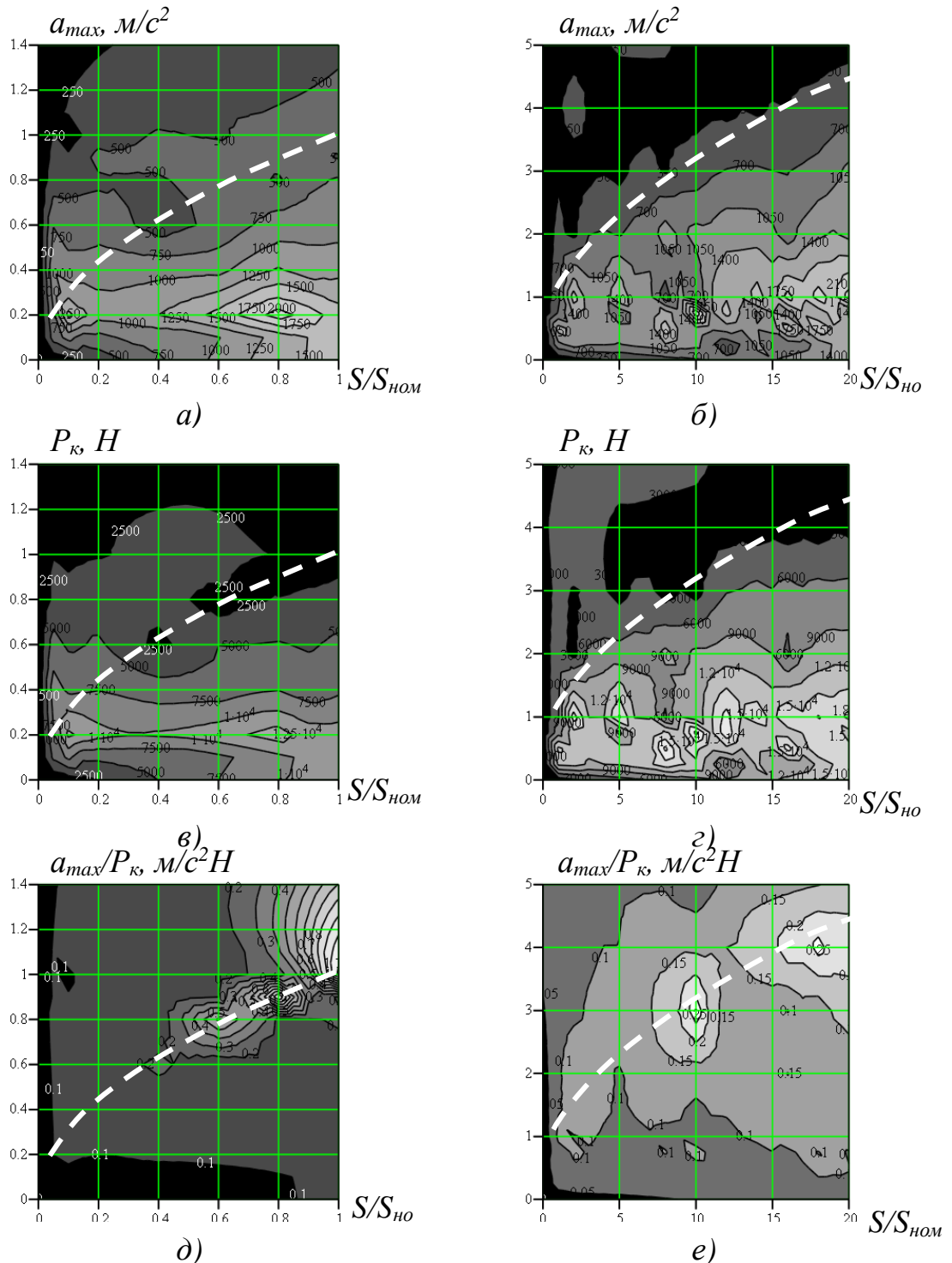


Рисунок 3. Зависимости ускорений ленты a_{max} (а, б), контактных усилий в ленте $P_{к}$ (в, г) и отношения ускорений ленты к контактной силе $a_{max}/P_{к}$ (д, е) от отношений натяжений ленты текущего и номинального $S/S_{ном}$ и возмущающей частоты к собственной частоте очистителя $f/f_{0в}$ для конвейера 2Л100У при постоянной силе магнита. Рисунки а, в, д - уклонный конвейер ($S=105 \text{ кН}$); б, г, е - бремсберговый конвейер ($S=4 \text{ кН}$)

Таким образом, можно говорить о целесообразности изменения частоты возмущения в переходных режимах работы конвейера таким образом, чтобы она соответствовала собственной частоте ленты.

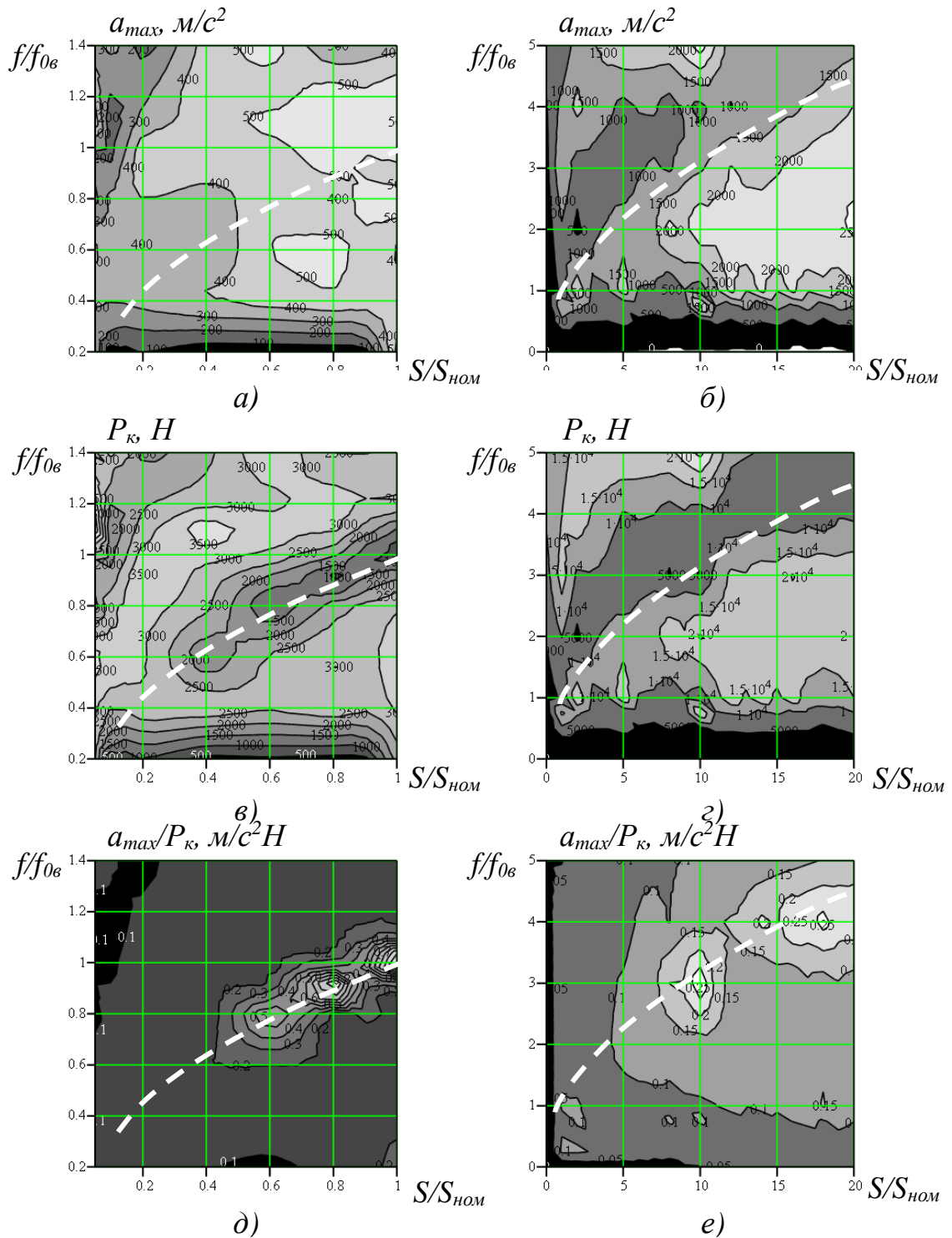


Рисунок 4. Зависимости ускорений ленты a_{max} (а, б), контактных усилий в ленте P_k (в, г) и отношения ускорений ленты к контактной силе a_{max}/P_k (д, е) от отношений натяжений ленты текущего и номинального $S/S_{ном}$ и возмущающей частоты к собственной частоте очистителя $f/f_{0в}$ для конвейера 2Л100У при постоянной энергии удара. Рисунки а, в, д - уклонный конвейер ($S=105$ кН); б, г, е - бремсберговый конвейер ($S=4$ кН)

Аналогичные исследования проводились и при работе очистителя, реализующего постоянную энергию удара. Ускорения ленты, при изменении частоты возмущения в соответствии с меняющимся натяжением ленты из условия обеспечения работы очистителя на собственной частоте ленты (пунктирная линия), для уклонного конвейера изменялись с 600 до 250 м/с² (рис. 4, а), для бремсбергового - от 600 до 1500 м/с² (рис. 4, б).

Контактные усилия вдоль пунктирной линии минимальны как для уклонного конвейера – от 500 до 2500 Н (рис. 4, в), так и для бремсбергового – 5000 Н – 10000 Н (рис. 4, з).

Значения отношения ускорения ленты к контактными силам вдоль пунктирной линии максимальны и, соответственно, для уклонного конвейера достигают 1 м/с²Н (рис. 4, д), а для бремсбергового 0,25 м/с²Н (рис. 4, е).

Максимальное значение отношения виброускорения ленты к контактной силе наблюдается при совпадении собственных частот очистителя и ленты с частотой возмущения (пунктирные линии на рис. 4). Изменение частоты возмущения в соответствии с режимами, обозначенными пунктирными линиями, позволит обеспечить практически постоянные значения виброускорений в режимах работы конвейера, отличных от номинальных.

Заключение.

Изменение натяжения ленты в процессе работы ленточного конвейера, обусловленное его загруженностью, приводит либо к существенному снижению эффективности очистки, либо повышению контактной силы в ленте и размаха колебаний рамы очистителя, что создает трудности в технической реализации электромагнитного вибровозбудителя для этих условий эксплуатации конвейеров.

Значения виброускорений при изменении натяжения ленты, обусловленного его загруженностью, остаются относительно постоянными при совпадении собственной частоты ленты с частотой возмущения. Следовательно, виброочистители могут быть использованы на всем диапазоне рабочих натяжений ленты при:

- применении натяжных устройств, обеспечивающих постоянство натяжения в различных режимах работы конвейера;
- обеспечении изменения частоты возмущения в соответствии с текущей собственной частотой ленты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Галкин, В. И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В. И. Галкин, В. Г. Дмитриев, В. П. Дьяченко, И. В. Запенин, Е. Е. Шешко. – Москва: МГГУ, 2005. – 543 с.
2. Николаев, Е. Д. Антология очистки конвейерных лент от налипающих пород / Е. Д. Николаев, В. В. Чаплыгин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 3. – С. 386-399.
3. Будишевский, В. А. Сравнительный анализ технологий очистки конвейерных лент / В. А. Будишевский, Е. М. Арефьев // Вести Донецкого горного института. – 2009. – №1. – С. 8-11.
4. Будишевский, В. А. Сравнительный анализ качества очистки конвейерных лент ножевыми и вибрационными очистителями / В. А. Будишевский, Е. М. Арефьев,

Н. В. Хищенко, А. В. Мерзликин / Вести Донецкого горного института. – 2008. – №2. – С. 202-209.

5. Каледин, В. В. Способы очистки конвейерной ленты / В. В. Каледин, А. А. Абдрахманов, Г. Г. Сафин, Э. И. Суфияров, В. С. Великанов // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 12 (68). – С. 257-261.

6. Бибииков, П. Я. Установление рационального типа и параметров механических очистных устройств ленточных конвейеров горных предприятий по переработке нерудного сырья: дисс. кандидата техн. наук: / П. Я. Бибииков – Москва – 2002. – 227 с.

7. Зиневич, В. Д. Вибрационная очистка конвейерных лент / В. Д. Зиневич, Ю. А. Пертен // Горные машины и автоматика. - М.: ЦИТИУгля. - 1961. – №1. – С. 71-76.

8. Арефьев, Е. М. Определение диапазона частот настройки виброочистителей шахтных ленточных конвейеров / Е. М. Арефьев, А. П. Кирьян // Вестник ДонНТУ. – 2019. – №3(17). – С. 3-8.

9. Кондрахин, В. П. Оптимизация параметров вибрационного очистителя конвейерной ленты / В. П. Кондрахин, Е. М. Арефьев // Горная электромеханика и автоматика. – 2012. – Вып. 88. – С. 84-89.

10. Арефьев Е. М. Определение качественных характеристик влияния параметров ленточного конвейера и очистителя на эффективность процесса виброочистки / Е. М. Арефьев, С. А. Матвиенко, А. В. Лукичев // Сборник трудов 17 международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека». – Екатеринбург, 4-5 апреля 2019 г. – С. 106 -107.

11. Правила безопасности в угольных шахтах / Государственный Комитет горного и технического надзора ДНР. – Донецк, 2016. – 217 с.

12. Кондрахин, В. П. Математическая модель процесса вибрационной очистки конвейерной ленты / В. П. Кондрахин, Е. М. Арефьев, Н. В. Хищенко // Научные труды ДонНТУ. Серия горно-электромеханическая. – 2012. – Вып. 23(196). – С. 83-91.

13. Кондрахин, В. П. Оптимизация параметров вибрационного очистителя конвейерной ленты / В. П. Кондрахин, Е. М. Арефьев // Горная электромеханика и автоматика. – 2012. – Вып. 88. – С. 84-89.

Поступила в редколлегию 16.01.2020 г.

УДК 539.22.23;541.412

В. И. Бутенко, д-р техн. наук, профессор,**И. В. Садовая**, инженер

Донской государственный технический университет

Тел.: + 7-863-2-738-385; +7-928-600-57-61; E-mail: butenkowiktor@yandex.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИКРОЧАСТИЦ В МОДИФИЦИРОВАННОМ МАТЕРИАЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ

Выполнено аналитическое исследование энергетического взаимодействия микрочастиц модифицированного слоя на поверхности детали, определившее их закономерности и доказавшее соответствие удельной накопленной энергии деформации материала поверхностного слоя величине удельной энергии адгезии микрочастиц, зависящей от внешних воздействий на деталь в процессе её обработки и эксплуатации. Определены обоснованные подходы к выбору компонентов для модифицирования материала поверхностного слоя детали с учётом их технологической совместимости.

Ключевые слова: микрочастицы, деталь, поверхностный слой, взаимодействие, энергия, технологическая совместимость.

V. I. Butenko, I.V. Sadovaya

ENERGY INTERACTION OF MICROPARTICLES IN MODIFIED MATERIAL OF THE SURFACE LAYER OF THE PART

An analytical study of the energy interaction of the microparticles of the modified layer on the surface of the part was carried out which determined their regularities and proved the correspondence of the specific accumulated energy of deformation of the material of the surface layer to the specific energy of adhesion of microparticles which depends on external charges on the part. Reasonable approaches to the selection of components for modifying the material of the surface layer of the part are determined taking into account their technological compatibility.

Keywords: microparticles, detail, surface layer, interaction, energy, technological compatibility.

1. Введение

В работе [1] получена формула определения плотности внутренней энергии материала, которая позволяет в общем оценивать склонность материала к накоплению повреждаемостей. Использование её открывает возможности в установлении функциональной связи технологической совместимости модифицирующих элементов материала поверхностного слоя детали с его энергетическим состоянием, а также выявить связи компонентов внутри него при создании многокомпонентных функциональных слоёв или покрытий. Результаты выполненных исследований, представленные в работе [2], свидетельствуют о том, что в сложных модифицированных слоях материала поверхностного слоя деталей или созданных на их поверхностях многокомпонентных функциональных слоях взаимодействие микрочастиц складывается из суммы различных связей, обусловленных химическими, молекулярными, электрическими и другими взаимодействиями. При этом под микрочастицами понимаются отдельные химические соединения (например, карбид железа Fe_3C) или их структурные объединения (комплексы) наноразмерной величины в виде зёрен, кластеров и т.д. Их энергетическое взаимодействие во многом определяет эффективность создания того или иного модифицированного или многокомпонентного функционального слоя на поверхности детали с учётом конкретных условий её эксплуатации.

2. Основное содержание и результаты работы

В общем случае совместное действие микрочастиц определяет величину потенциальной энергии \mathcal{E}_Σ , которая при наличии ван-дер-ваальсовых сил может быть представлена следующим выражением [3]:

$$\mathcal{E}_\Sigma = -\frac{A}{r^6} + B\varepsilon_\Sigma^{-cr}, \quad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от ориентационного, поляризационного или дисперсионного эффектов; принимает соответствующие значения через дипольный момент, температуру и другие параметры вещества [1, 3]; B и c – некоторые константы, характеризующие физико-механические свойства вещества; ε_Σ – элементарная энергия микрочастицы, определяемая в зависимости по зависимостям, полученным в работе [1]; r – расстояние между микрочастицами.

В выражении (1) первое слагаемое – потенциал ван-дер-ваальсовых сил притяжения микрочастиц, а второе – потенциал сил отталкивания, который часто представляют в виде B/r^m , где показатель степени $m > 6$ [3]. Графическое представление зависимости суммарной потенциальной энергии \mathcal{E}_Σ от расстояния между микрочастицами в материале поверхностного слоя детали r в общем виде дано на рис. 1.

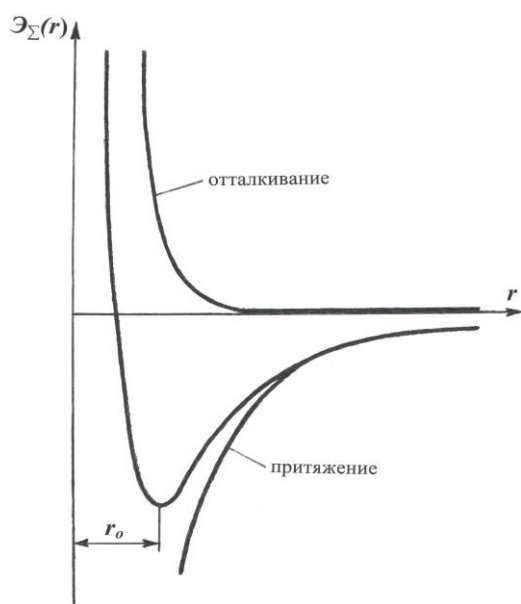


Рисунок 1. Графическая интерпретация зависимости потенциальной энергии \mathcal{E}_Σ от расстояния между микрочастицами r

Анализ результатов выполненных исследований по установлению связей между микрочастицами, выполненный в работе [3], позволил сделать вывод о том, что энергия межмолекулярных связей на 2-3 порядка ниже энергии внутримолекулярных связей, а радиус их действия, наоборот, на порядок больше. Например, если энергия химических сил связи измеряется величиной 100 – 500 ккал/моль, то энергия межмолекулярных сил связи, в частности ван-дер-ваальсовых, определяется величиной порядка 0,08 – 0,3 ккал/моль, а равновесные расстояния r_0 составляют соответственно 1 – 3 Å и 3 – 50 Å. Этот факт, как и многие другие [1, 2, 4, 5] свидетельствуют о том, что, не смотря на

огромное многообразие микрочастиц в модифицированном материале поверхностного слоя детали, отличающихся размерами, электрическими зарядами, химическим составом и т.д., а также природы их взаимодействия, между ними имеется ряд общих закономерностей, справедливых независимо от типа микрочастиц и физико-химической природы связей. Эти закономерности должны учитываться как при анализе напряжённого и деформированного состояния материала поверхностного слоя детали, так и при установлении технологической совместимости используемых компонентов при его модифицировании. К ним относятся следующие положения:

1) как внутримолекулярные, так и межмолекулярные взаимодействия микрочастиц в материале поверхностного слоя детали приводят к появлению так называемых микросил, которые могут быть либо силами притяжения частиц F_{np} , резко убывающими с увеличением расстояния r , либо силами отталкивания F_{om} , неограниченно возрастающими по мере уменьшения расстояния r между микрочастицами;

2) общая сила взаимодействия микрочастиц F , представляющая собой сумму микросил F_{np} и F_{om} , тесно связана с суммарной потенциальной энергией $\mathcal{E}(r)$, которая может быть определена из зависимости, представленной на рис. 1. Исходя из неё, приближённо функция $\mathcal{E}(r)$ для всех случаев взаимодействия двух микрочастиц может быть выражена следующей формулой:

$$\mathcal{E}(r) = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m}. \quad (2)$$

В формуле (2) первое слагаемое определяет потенциал сил притяжения микрочастиц, а второе – отталкивания. Коэффициенты A , B и показатели степеней n , m определяются природой микрочастиц и сил связей, причём $m > n$ [3];

3) если во взаимодействии микрочастиц преобладают силы отталкивания F_{om} , то частицы удаляются друг от друга; в противном случае они приближаются друг к другу до тех пор, пока усилия притяжения F_{np} и отталкивания F_{om} взаимно не уравновесятся. Такое равновесное положение во взаимодействии между микрочастицами соответствует минимуму потенциальной энергии $\mathcal{E}(r)$, то есть нижней точке энергетической кривой, представленной на рис. 1. При этом равновесное расстояние r_0 может быть определено согласно рассматриваемого условия при $F = 0$, исходя из зависимости

$$F = \frac{d\mathcal{E}(r)}{dr}; \quad (3)$$

4) равновесное состояние микрочастиц в материале поверхностного слоя не обязательно должно соответствовать их неподвижному состоянию. Под влиянием внешних факторов (давления, температуры, воздействия электрических, магнитных полей и т.д.) микрочастицы могут перемещаться в пространстве (в материале поверхностного слоя), создавая флуктуации суммарной потенциальной энергии $\mathcal{E}(r)$. Согласно исследованиям, представленным в работе [5], вблизи равновесного состояния r_0 результирующая энергия взаимодействия микрочастиц материала сформировавшегося поверхностного слоя $\mathcal{E}(r)$ может быть определена по формуле

$$\mathcal{E}(r) = \begin{cases} \beta_1(r - r_0)^2, & 0 \leq r \leq r_0 + \Delta r_{0,1}; \\ \beta_2(r - r_0)^2, & r_0 + \Delta r_{0,1} \leq r \leq r_0 + \Delta r_{0,2}, \end{cases} \quad (4)$$

где β_1 и β_2 – коэффициенты пропорциональности, зависящие от физико-механических свойств микрочастиц и соотношения расстояния между ними r и средним размером микрочастиц [5];

$\Delta r_{0,1}$ и $\Delta r_{0,2}$ – расстояния между микрочастицами, до которых реализуется равновесное положение во взаимодействии их между собой при коэффициентах пропорциональности β_1 и β_2 , причём $\beta_1 > \beta_2$;

5) в процессе модифицирования материала поверхностного слоя детали или создания на нём многокомпонентного функционального слоя силы взаимодействия F , F_{np} , $F_{от}$ имеют определённое направление, поэтому, несмотря на сложную природу их происхождения, схематично их можно изобразить векторами;

6) переход к характеристике макросистем, образуемых большим числом микрочастиц и их комплексов при модифицировании материала поверхностного слоя детали или создания на нём многокомпонентного функционального слоя, может быть осуществлён с помощью принципа аддитивности, получившего достаточно широкое распространение при объяснении многих экспериментальных фактов. Согласно этому принципу свойства всей системы в первом приближении определяются суммированием свойств отдельных элементов. Отсюда вытекает, например, невозможность разрушения материального тела, т.е. разделение его на отдельные части, при всестороннем сжатии, когда все микрочастицы тела сближаются (однако это верно до тех пор, пока не начнётся разрушение электронных оболочек атомов). Следует также иметь в виду, что при рассмотрении макросистем достаточно учитывать взаимодействие лишь ближайших микрочастиц, так как микрочастицы, находящиеся на расстояниях r , много больших r_0 , практически не взаимодействуют;

7) в случае отсутствия внешнего воздействия на материал поверхностного слоя детали микрочастицы находятся в квазиравновесном устойчивом состоянии [6], при котором в любом условно принятом малом объёме материала поверхностного слоя детали микросилы, силы притяжения и отталкивания между микрочастицами в среднем компенсируют друг друга, а сами микрочастицы находятся в термодинамически равновесном устойчивом состоянии;

8) вследствие флуктуации тепловой энергии, вызванной процессом обработки детали или действием множества случайных эксплуатационных факторов, для микрочастиц материала поверхностного слоя в каждый момент времени имеет место более или менее значительное отклонение их от равновесного состояния и переход материала поверхностного слоя, как системы, в новое равновесное состояние. Следует отметить, что такой переход становится возможным при условии преодоления микрочастицами потенциального барьера, уровень которого определяется их энергией активации [4, 5].

Существует, по-видимому, корреляция между потенциальной энергией $\mathcal{E}(r)$ и удельной накопленной энергией материала поверхностного слоя детали $\mathcal{E}_{уд}$. Действительно, прочность сцепляемости слоёв и покрытий с основным материалом детали $\tau_{сц}$ зависит от адгезионной силы $F_{ад}$, величина которой определяется сложными процессами, протекающими в материале поверхностного слоя при его формировании. Чтобы условно разъединить модифицированный или многокомпонентный функциональный слой и основной материал поверхности детали, требуется совершить работу, необходимую для проведения возникших между ними сил притяжения, которые составляют большую (основную) часть адгезионной силы $F_{ад}$. Для этого необходимо увеличить потенциальную энергию микрочастиц модифицированного или многокомпонентного слоя $\mathcal{E}(r)$ на определённую величину за счёт сообщения им дополнительной энергии, т.е. совершить некоторую работу $A_{вн}$. При этом величина работы $A_{вн}$ равна произведению числа взаимодействующих микрочастиц модифицированного или многокомпонентного функционального слоя с основным материалом поверхностного слоя детали N на плотность потока энергии или удельную накопленную энергию деформации $\mathcal{E}_{уд}$, передавае-

мую микрочастицами нижним слоям поверхностного слоя, которую можно определить по формулам, приведённым в работах [7 – 11].

В работе [12] предложено энергию адгезии равновесной системы \mathcal{E}_{ad} , состоящей из основного материала поверхности детали (подложки) и покрытия (или модифицированного слоя), рассматривать как сумму энергий двух подсистем: энергии связи микрочастиц основного металла \mathcal{E}_m и энергии взаимодействия микрочастиц модифицированного слоя или покрытия $\mathcal{E}(r)$, т.е.

$$\mathcal{E}_{ad} = [\mathcal{E}_m \pm \mathcal{E}(r)] \cdot S, \tag{5}$$

где S – площадь взаимодействия двух подсистем поверхностного слоя детали.

Знак «+» в формуле (5) принимается в случае модифицирования или создания многокомпонентного функционального слоя с использованием высококонцентрированных источников энергии (плазмы, лазера и других), а знак « – » принимается при механическом или электролитическом модифицировании материала поверхностного слоя, нанесении на него покрытия или создании многокомпонентного функционального слоя.

Удельная энергия связи микрочастиц основного металла \mathcal{E}_m может быть определена по формуле [5]:

$$\mathcal{E}_m = \sum_{i=1}^3 N \left(\mathcal{E}_{\Sigma_i} - W_i n_i K_B \frac{\Theta}{2} \right), \tag{6}$$

где W_i – вероятность возбуждения степеней свободы микрочастицы, которые приводят к разрыву энергии связи; n_i – число степеней свободы, которые участвуют в ослаблении бинарного взаимодействия микрочастиц; K_B – постоянная Больцмана; Θ – температура материала поверхностного слоя, Кельвин.

Учитывая, что энергия взаимодействия микрочастиц модифицированного слоя или покрытия $\mathcal{E}(r)$ определяется по формуле (4), для энергии адгезии \mathcal{E}_{ad} справедлива следующая зависимость:

$$\mathcal{E}_{ad} = \left[\sum_{i=1}^3 N \left(\mathcal{E}_{\Sigma_i} - W_i n_i K_B \frac{\Theta}{2} \right) \pm N \left\{ \begin{array}{l} \beta_1 (r - r_0)^2, 0 \leq r \leq r_0 + \Delta r_{0,1}; \\ \beta_2 (r - r_0)^2, r_0 + \Delta r_{0,1} \leq r \leq r_0 + \Delta r_{0,2} \end{array} \right\} \right] S. \tag{7}$$

В общем случае величина энергии \mathcal{E}_{ad} , определяемая по формуле (7), соответствует накопленной энергии деформации, удельная величина которой $\mathcal{E}_{y\partial}$ может быть выражена через зависимости, приведённые в работах [7 – 10]:

$$\mathcal{E}_{y\partial} = Q \cdot G \cdot b^2 \cdot \rho; \quad \sigma = \sigma_m + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho}; \quad G = \frac{\sigma - \sigma_m}{\alpha \cdot b \cdot \sqrt{\rho}};$$

$$\mathcal{E}_{y\partial} = \frac{Q(\sigma - \sigma_m) \cdot \sqrt{\rho}}{\alpha \cdot b}, \tag{8}$$

где Q – коэффициент пропорциональности; $Q = 0,5 - 1$ [8 – 10]; σ – напряжение, необходимое для движения подвижных дислокаций, Па; σ_m – предел текучести материала детали, Па; ρ – плотность дислокаций, см⁻²; α – параметр междислокационного взаимодействия; b – вектор Бюргерса.

Были выполнены сравнительные расчёты удельной энергии адгезии микрочастиц \mathcal{E}_{ad} и удельной накопленной энергии деформации $\mathcal{E}_{y\partial}$ модифицированного медью поверхностного слоя детали площадью $S = 1$ см² в зависимости от температуры Θ . Медный слой толщиной $10 \pm 0,1$ мкм наносился на плоские пластины из стали 12ХНЗА размером 100x100 мм электролитическим путём по технологии, изложенной в работе [2]. Перед нанесением медного слоя поверхности пластин шлифовались и подвергались

предварительному контролю по параметрам шероховатости Ra , микротвёрдости Hv , глубине слоя с изменёнными физико-механическими свойствами ΔH и плотности дислокаций ρ . Для исследования отбирались пластины, имеющие $Ra = (1,2 - 1,5)$ мкм, $H_{0,49} = (2,6 - 2,8)$ ГПа, $\Delta H = (0,30 - 0,32)$ мм, $\rho = (5 - 6) \cdot 10^{10}$ см⁻². Согласно данным, приведённым в работах [3 – 5, 12], при вычислении удельной энергии адгезии \mathcal{E}_{ad} были приняты следующие значения параметров, входящих в зависимость (7): $n_i = 3$, $r = 5,6 \text{ \AA}$, $r_o = 10 \text{ \AA}$, $N = 3,1 \cdot 10^{14}$, $K_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $\beta_1 = 0,35$. Вероятность возбуждения степеней свободы микрочастиц W_i определялась из функции распределения Максвелла-Больцмана по энергетическим уровням [5].

Расчёты удельной накопленной энергии деформации $\mathcal{E}_{y\delta}$ проводились как для поверхности пластины после шлифования, так и после нанесения медного слоя. При этом плотность дислокаций материала поверхностного слоя детали ρ определялась по уширению дифракционных линий, полученных на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-3М».

На рис. 2 приведены результаты расчётов $\mathcal{E}_{y\delta}$ и \mathcal{E}_{ad} в зависимости от температуры Θ , из анализа которых следует, что вычисленная по формуле (7) удельная энергия адгезии \mathcal{E}_{ad} с погрешностью (10 – 15)% определяет удельную накопленную энергии деформации $\mathcal{E}_{y\delta}$. Это позволяет выполнять подбор компонентов для создаваемых на

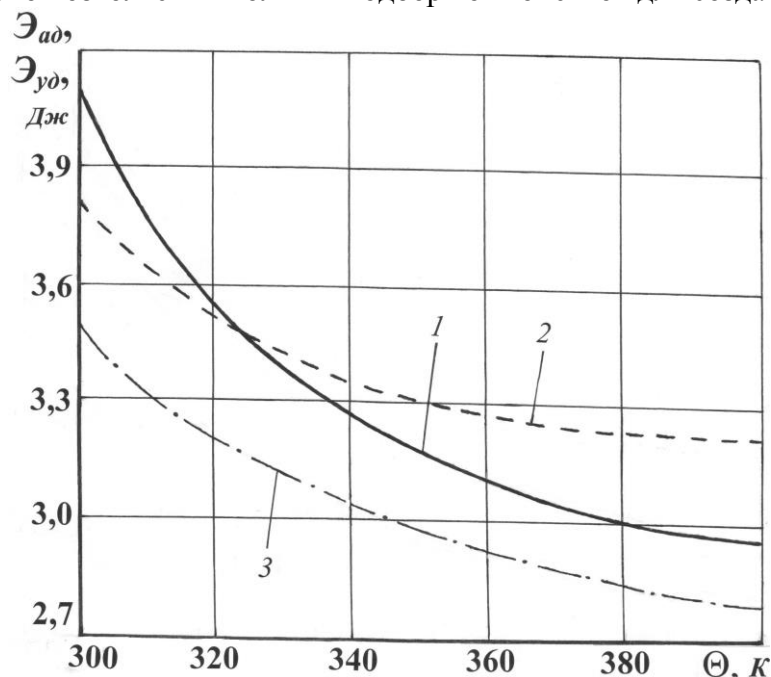


Рисунок 2. Расчётные значения \mathcal{E}_{ad} и $\mathcal{E}_{y\delta}$ поверхностей деталей в зависимости от температуры Θ : 1 – \mathcal{E}_{ad} поверхности с медным слоем; 2 – $\mathcal{E}_{y\delta}$ шлифованной поверхности; 3 – $\mathcal{E}_{y\delta}$ поверхности с медным слоем.

поверхности детали модифицированных слоёв по их адгезионному взаимодействию с основным материалом, что во многих случаях значительно проще осуществлять в производственных условиях [2, 7].

3. Заключение

Таким образом, в процессе формирования поверхностного слоя при механической обработке детали, а также при создании на её поверхности модифицированного

или многокомпонентного функционального слоя в результате внешних воздействий, обусловленных механическими, тепловыми, структурно-фазовыми и другими явлениями, изменяется энергетическое состояние материала поверхности, оказывающее влияние на её эксплуатационные свойства. Изменение энергетического состояния модифицированного материала поверхностного слоя детали, вызванное энергетическим взаимодействием микрочастиц, входящих в его состав, является определяющим фактором технологической совместимости компонентов модифицированного слоя с основным материалом детали.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бутенко, В. И. Структура и потенциал трибоконтакта поликристаллических материалов / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – 160 с.
2. Бутенко, В. И. Модифицированные и многокомпонентные функциональные слои на поверхностях деталей машин / В.И. Бутенко. – Ростов-на-Дону, 2016. – 235 с.
3. Огибалов, П. М. Механика полимеров / П. М. Огибалов, В. А. Ломакин, Б. П. Кишкин. – Москва: Изд-во МГУ, 1975. – 528 с.
4. Бутенко, В. И. Высокопрочные и сверхпрочные состояния металлов и сплавов / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. – 219 с.
5. Бутенко, В. И. Физико-технологические основы формирования управляемых структур сталей и сплавов / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 264 с.
6. Бутенко, В. И. Формирование и изнашивание поверхностного слоя детали / В.И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. – 193 с.
7. Безъязычный, В. Ф. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей машин при упрочнении в процессе шлифования / В.Ф. Безъязычный, М. А. Прокофьев, А. Н. Сулягин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – №1. – С. 3 – 6.
8. Прокофьев, М. А. Энергетический критерий оптимизации режимов обработки деталей шлифованием / М.А. Прокофьев // Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013): Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. – Курск: Изд-во Юго-Западного гос. ун-та, 2013. – С. 334 - 336.
9. Прокофьев, М. А. Взаимосвязь скрытой энергии деформации с технологическими условиями механической обработки / М. А. Прокофьев, Н. В. Виноградова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №1. – С. 3 - 7.
10. Тимофеев, М.В. Методика и аппаратура измерения накопленной энергии деформации в поверхностном слое деталей машин / М.В. Тимофеев, М.А. Прокофьев // Научно-технологические технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ-2012): Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Ч.II. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2012. – С. 25 - 29.
11. Лебедев, В. А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования / В. А. Лебедев. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2006. – 183 с.
12. Кабалдин, Ю. Г. Квантово-механическое моделирование энергии адгезии наноструктурных покрытий с режущим инструментом и с обрабатываемым материалом / Ю. Г. Кабалдин, Е. Е. Власов, А. М. Кузьмишина // Упрочняющие технологии и покрытия. – Том 14. – 2018. – №8(64). – С. 339 - 343.

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.

УДК 620.173.2

В. А. Витренко, д-р техн. наук, профессор, **Г. В. Сыровой**, к.т.н., доцент,
А. А. Афошин, ассистент

Луганский Национальный Университет имени Владимира Даля, ЛНР

Тел./Факс: +38 050 5492825; E-mail: [vitrenko.vl@gmail.com](mailto:vitrengo.vl@gmail.com)

Тел./Факс: +38 072 1413836; E-mail: rodgis@mail.ru

Тел./Факс: +38 050 8862369; E-mail: 80508862369@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ В 3-D ПЕЧАТИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПО FDM-ТЕХНОЛОГИИ

Приведены результаты экспериментальных исследований параметров при 3D-печати цилиндрических образцов по FDM-технологии. Проанализировано влияние скорости на прочностные характеристики детали. Установлены зависимости изменений прочности изделия от скорости печати.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, FDM-технология, скорость заполнения модели, прочность детали из АБС-пластика.

V. A. Vitrenko, G. V. Syrovoy, A. A. Afoshin

INFLUENCE OF THE SPEED IN 3-D PRESSES ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF CYLINDRICAL SAMPLES ON FDM-TECHNOLOGY

The results of experimental studies of parameters in 3D printing of cylindrical samples using FDM technology are presented. The effect of speed on the strength characteristics of the part is analyzed. The dependences of changes in the strength of the product on the speed of printing.

Keywords: additive technologies, 3D printing, FDM technology, model filling speed, strength of an ABS plastic part.

1. Введение

Решение проблемы повышения конкурентоспособности продукции находится в приоритете всех отраслей промышленности и применение аддитивных технологий (АТ) является одной из ведущих тенденций роста современного производства. Технология моделирования методом наплавления – известная как Fused Deposition Modeling (FDM-технология) значительно экологичнее, проще в эксплуатации и дешевле. Так же послойное наплавление детали по FDM-технологии в сравнении с классической обработкой заготовки на станках дает преимущество в исключении ручного труда.

Базовым фундаментом для определения механических свойств детали являются знания о реакциях используемого материала при различных нагрузках. По известной величине деформации, которую может создавать данная нагрузка, инженер-конструктор способен заведомо определять поведение детали в условиях эксплуатации.

К технологическим параметрам режима печати по FDM-технологии входят рабочие параметры и системные настройки, используемые во время цикла изготовления детали. Для получения детали по FDM-технологии, ключевыми параметрами выступают: скорость заполнения модели, плотность заполнения модели, толщина стенки, температура печати. Данные параметры регулирует пользователь, а такие параметры как: время печати, количество слоев, и т.п. выдает программа подготовки к печати – слайсер [1].

В работах [5-10] приводятся результаты исследований на прочность образцов, напечатанных с помощью FDM технологии, однако в научной и технической литерату-

ре нет достаточно обоснованных рекомендаций по технологическим параметрам для режимов печати по FDM-технологии. Поэтому изучение особенностей печати по FDM-технологии и их влияние на прочностные характеристики изготавливаемых изделий представляют особый практический и научный интерес.

Целью работы является определение зависимости прочностных характеристик цилиндрических образцов, изготовленных по FDM-технологии от скорости печати.

Задачи исследования – изучить основные параметры режима печати по FDM-технологии, установить зависимость влияния параметра скорости на прочностные характеристики для цилиндрических образцов.

2. Основное содержание и результаты работы. Исследования проводились на цилиндрических образцах из полимерного материала, представленным термопластом акрилонитрилбутадиенстиролом (аббр. АБС-пластик с химической формулой $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$ и международным CAS-номером 9003-56-9). Механические свойства материала представлены в таблице 1 согласно ГОСТам, данным исследований и производителя.

Таблица 1. – Физико-механические свойства АБС-пластика

Параметр	Значения параметров в соответствии с		
	данными 345	ГОСТ*	данными производителя
Плотность, г/см ³	1,04...1,12	1,03...1,05	1,04...1,05
Модуль Юнга, ГПа	1,9...2,7		1,6...2,3
Предел прочности, МПа	32...56		22...36
Предельное относительное удлинение, %	15...40	3...7	4...6
Твердость	Роквелл (R) 75...120	98	

*номера ГОСТов: плотность – 15139, предельное относительное удлинение – 11262; твердость – 4670; модуль упругости при изгибе – 9550-81.

Для исследований был изготовлен ряд образцов при скорости печати в интервале от 10 до 150 мм/с. При этом исследуемый цилиндрический образец имеет следующие параметры: наружный диаметр 20 мм, внутренний 18 мм, толщина стенки 1 мм, длина изделия 50 мм.

Для печати использовался 3D принтер «TEVO Tarantula i3», обработка моделей для печати проводилась в программе Simplify 3D согласно [2], параметры печати представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Применяемые параметры режима печати по FDM-технологии

№	Управляет параметром	Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
1	2	3	4	5
1	Пользователь	Сырье	-	полиамид белый
2		Диаметр нити	мм	1,75
3		Диаметр сопла	мм	0,2
4		Скорость заполнения модели	мм /с	от 10 до 150
5		Плотность заполнения модели	%	100

6		Толщина стенок	мм	0,1
7		Температура печати: - сопла - стола	°С	240 80
8	Слайсер	Время печати		от 23 часа 30 мин до 1ч 57 мин
9		Количество слоев	шт.	от 183224 до 183716
10		Общий вес (модели + поддержки)	г	3,77
11		Расход нити	мм	1252,6

Испытания проводились согласно [3] на разрывной машине модели Р-0,5, которая предназначена для испытаний на растяжение при температуре окружающей среды от 10 до 35 °С. Поэтому для испытаний на сжатие было изготовлено специальное приспособление, показанное на (рис. 1, а), оно состоит из верхнего кронштейна и нижнего, с помощью которых приспособление закреплялось в захватах разрывной машины (рис. 1, б). На образец по торцам надевались вставки для предотвращения торцевого смятия, так, что исследуемая зона составляла 40 мм.



Рисунок 1: а) приспособление для испытания на сжатие; б) приспособление с образцом в разрывной машине

Во время испытания измеряли разрывное усилие и перемещение. На рис. 2 приведены образцы после испытания, а полученные данные представлены в таблице 3.



Рисунок 2. Образцы после испытания

Замеры проводили согласно ГОСТ [4]. На основании замеров всех образцов были получены средние значения, результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3. Средние значения полученных замеров образцов

№	Скорость печати модели $V_{п}$, (мм/с)	Усилие сжатия, σ , (МПа)	Полученное перемещение, мм
1	10	4,38	7
2	30	4,29	7
3	50	4,24	7
4	70	4,04	7
5	90	4,06	7
6	110	4,21	8
7	130	4,21	9
8	150	3,76	8

Результаты эксперимента обрабатывали с помощью статистического метода средних величин, на основе которого были определены зависимости изменений прочности от скорости печати детали. По результатам обработки замеров получен график зависимости прочности от скорости печати цилиндрических образцов (см. рис. 3).

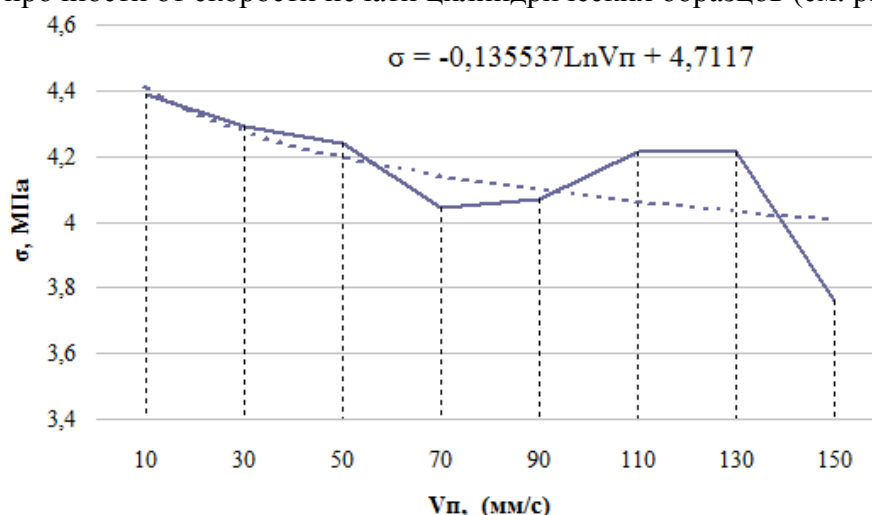


Рисунок 3. График зависимости прочности от скорости печати образцов

На полученном графике (рис. 3) явно выделяются четыре области прочности на сжатие испытываемых образцов. В первую область при скорости от 10 до 50 мм/с попадают изготовленные образцы при печати с повышенной прочностью на сжатие (4,38-4,24 МПа). В третью область при скорости печати от 100 до 130 мм/с попадают образцы имеющие прочность 4,21 МПа. В четвертой области при скорости 150 мм/с идет резкое снижение прочностных свойств.

Представленная зависимость второй областью при скорости печати от 50 до 100 мм/с имеет участок, на котором эмпирическая кривая вырождается в прямую. Во второй области образцы имеют равномерную прочность, наиболее удовлетворяющей паспортным данным материала печати.

3. Заключение

Таким образом, выполненное исследование позволило реализовать следующее:

1. Изучены особенности технологии моделирования методом наплавления при получении цилиндрических образцов.
2. Изготовлено приспособление для испытания образцов на сжатие в соответствии с ГОСТом.
3. Определено, что наиболее конструктивная прочность на сжатие цилиндрических образцов получается при скорости печати от 50 до 100 мм/с.
4. Установлено, что разрыв образцов проходит в разных сечениях – это свидетельствует о равномерной прочности по всей поверхности изделия.
5. Направить дальнейшие исследования на изучение зависимости плотности заполнения модели от прочности цилиндрических образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 57558-2-017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы.
2. ГОСТ 20999-83. Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. Кодирование информации управляющих программ.
3. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002). Пластмассы. Метод испытания на сжатие.
4. ГОСТ 33694-2015. Пластмассы. Определение линейных размеров образцов для испытания.
5. Петров, М. А. Исследования по определению силовых характеристик процесса одноосного сжатия цилиндрических образцов, изготовленных из АБС-пластика по методу трехмерной печати [Текст] / М. А. Петров, Н. В. Косачев, Ф. Б. Прокопов. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – № 10. – Ч. 2 – С. 84-90.
6. Балашов, А. В. Исследование прочности изделий, полученных методом 3D-печати [Текст] / А. В. Балашов, А. О. Черданцев, Е. А. Новиковский, С. В. Ананьин, С. В. Белоплотов // [Ползуновский вестник](#). – Барнаул: [Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова](#), 2016, – № 2. – С. 61-64.
7. Петрова, Г. Н. Реологические свойства термопластичной композиции на основе поликарбоната: зависимость от температуры переработки; влияние на механические характеристики и размерную стабильность объектов, созданных по FDM-технологии [Текст] / Г. Н. Петрова, С. А. Ларионов, Ю. А. Сапего, М. М. Платонов // Труды ВИАМ. – 2017. – № 4. – С. 81-88.
8. Петрова, Г. Н. Исследование комплекса характеристик базовых материалов для FDM-технологии аддитивного синтеза. Физико-механические и теплофизические свойства [Текст] / Г. Н. Петрова, М. М. Платонов, В. А. Большаков, С. А. Пономаренко // Пластические массы. – 2016. – № 5-6. – С. 53-59.
9. Иванова, А. Е. Исследование на прочность образцов, напечатанных с помощью FDM технологии / А. Е. Иванова, С. С. Колмаков, Б. Г. Скуйбин, И. А. Лаптев. // Современный физический практикум. – 2016. – № 14. – С. 277-278.
10. Камоничкина, Н. В. Исследование прочностных характеристик модельного материала, получаемого методом FDM-печати [Текст] / Н. В. Камоничкина, И. В. Кочешков // Аддитивные технологии. – 2018. – № 3. – С. 39-41.

Поступила в редколлегию 18.01.2020 г.

УДК 621.9.62

В. В. Гусев, доктор технических наук, проф., **А. С. Афендиков**
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
Тел.: +38 (071) 4667631; E-mail: kawhileo91@gmail.com
Тел.: +38 (066) 3086754; E-mail: msmo@fimm.dgtu.donetsk.org

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВОРОТНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ГОЛОВКИ

В работе предложено, для повышения точности обработки наружного контура антенного обтекателя, применить шлифовальную головку с дискретным поворотом ее вокруг вертикальной оси. Применение шлифовальной головки позволяет устранить смещение точки профилирования на образующей алмазного круга при его перемещении вдоль образующей изделия. Анализ, разработанной математической модели механизма поворота показал быстродействие и устойчивость процесса поворота шлифовальной головки. Погрешность при дискретном повороте головки на порядок меньше динамической составляющей погрешности обработки при шлифовании обтекателя.

Ключевые слова: шлифование, точность, подача, структурная схема, устойчивость, быстродействие.

V. V. Gusev, A. S. Afendikov

INCREASING THE ACCURACY OF THE MACHINING OF FAIRING THROUGH THE USE OF A TURNABLE GRINDING WHEEL HEAD

In the work it is proposed for raising of the accuracy of machining of the outer contour of the antenna fairing to use the grinding wheel head with its discrete rotation around a vertical axis. The use of the grinding wheel head allows to eliminate the displacement of the profiling point on the diamond wheel generatrix when it moves along the workpiece generatrix. Analysis of the developed mathematical model of the rotation mechanism showed the operation speed and stability of process of rotation of the grinding wheel head. The error during discrete rotation of the wheel head is by an order lower than the dynamic component of the machining error at grinding of the fairing.

Keywords: grinding, accuracy, feed rate, structural scheme, stability, operation speed.

Введение. В современной промышленности широкое распространение находит изготовление изделий из керамических материалов, благодаря их специфическим свойствам. Эти свойства делают хрупкие неметаллические конструкционные материалы, в частности, ситаллы наиболее пригодными для применения в условиях агрессивных сред океана и космоса, в самолето- и ракетостроении [1,2].

Из-за высокой твердости материала механическая обработка заготовок возможна лишь абразивным алмазным инструментом. Получение требуемого качества поверхности после механической обработки таких деталей зависит от ряда факторов с учетом того, что одной из важных задач машиностроения является повышение производительности технологических процессов при одновременном снижении их себестоимости [1].

Основное содержание и результаты работы. Технологический процесс обработки изделий включает многооперационную обработку шлифованием как наружного, так и внутреннего их контуров на станках РТ 66202, оснащенных агрегатной шлифовальной головкой и системой прямого копирования. Схема обработки заготовки представлена на рис. 1.

Перед обработкой шлифовальная головка разворачивается на фиксированный угол относительно оси обрабатываемой заготовки. Как показал анализ формирования

погрешности обработки наружного контура изделия [3], основная погрешность обработки

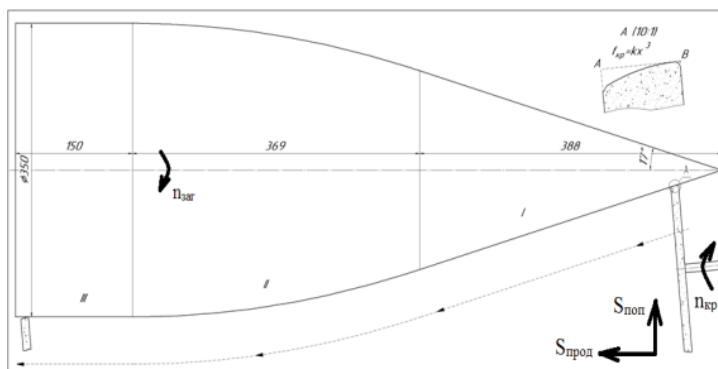


Рисунок 1. Схема обработки заготовки

связана со смещением профилирующей точки на образующей шлифовального круга, при его перемещении вдоль обрабатываемой заготовки. Существующая кинематическая погрешность существенно влияет на точность обработки и может превышать значение динамической в 10 раз.

При увеличении угла поворота оси шлифовального круга (в плоскости оси вращения заготовки и вектора продольной подачи) кинематическая погрешность уменьшается (рис.2), а в случае с изношенным кругом при $\alpha=10^\circ$ полностью исчезает. Однако проблема заключается в невозможности поворота шлифовальной бабки на большие углы (более 5°) из-за касания корпуса шлифовальной головки и обрабатываемой заготовки [3].

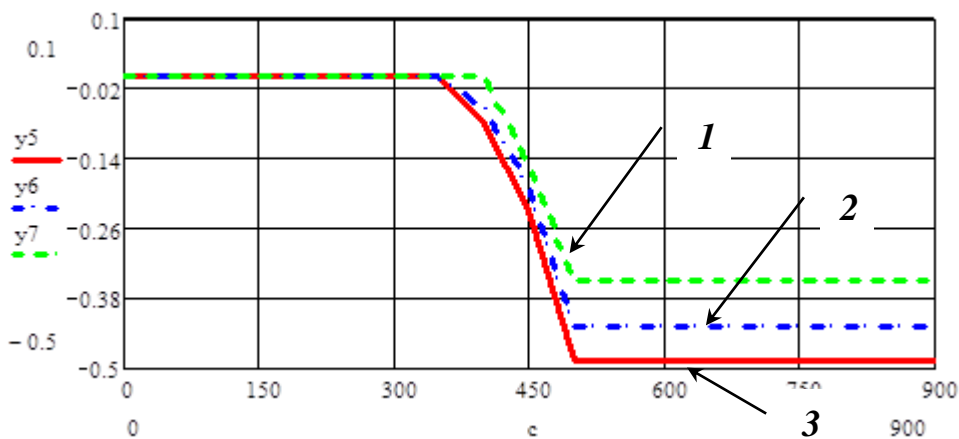


Рисунок 2. Величины погрешностей копирования при различных углах разворота нового круга (1- погрешность, возникающая при развороте круга на 7° ; 2 - погрешность, возникающая при развороте круга на 6° ; 3 - погрешность, возникающая при развороте круга на 5°) [3]

С целью получения переменного по длине детали угла поворота шлифовального круга на кафедре мехатронных систем машиностроительного оборудования Донецкого национального технического университета была разработана конструкция безлюфтового привода устройства поворота шлифовальной бабки. Привод поворота шлифовальной бабки представляет собой двухступенчатый цилиндрическо-червячный редуктор с двумя подпружиненными червякам. Выходной вал привода – вал червячного колеса –

обеспечивает поворот стола с установленной на нем шлифовальной бабкой. Шлифовальный круг перенесен на противоположную сторону шпинделя токарного станка, что предотвращает контакт шлифовальной бабки с обрабатываемой заготовкой. Использование такой конструкции шлифовальной головки возможно только в системах с автоматическим управлением, так как в данном случае у оператора станка нет возможности непосредственного визуального наблюдения за процессом обработки. Основным достоинством такой конструкции является возможность осуществления поворота шлифовального круга на необходимый угол, из условия обеспечения постоянства формообразующей точки на шлифовальном круге при ее перемещении вдоль контура заготовки, что позволит устранить описанную выше кинематическую погрешность (рис. 3).

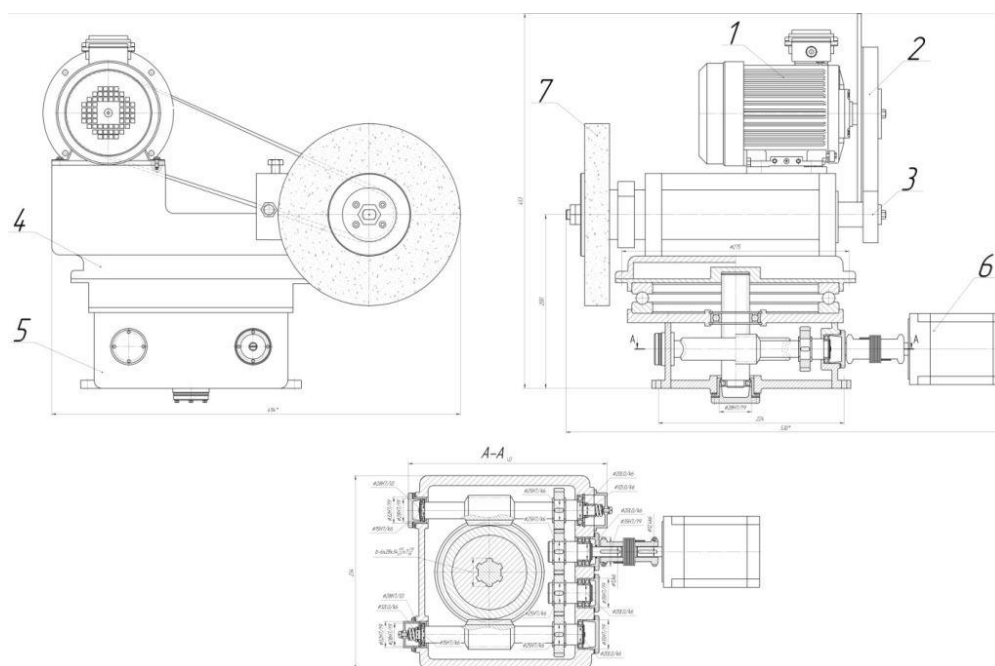


Рисунок 3. Конструкция модернизированной шлифовальной бабки и поворотного устройства (1 – двигатель привода круга, 2 – ременная передача, 3 – шпиндельный узел, 4 – корпус, 5 – поворотное устройство, 6 – шаговый двигатель привода поворотного устройства, 7 – шлифовальный круг)

В качестве направляющего элемента устройства поворота применен упорный подшипник, что уменьшило влияние момента трения в направляющих на общий момент сопротивления повороту. На основании уточненных исходных данных произведен повторный расчет зубчатых передач редуктора, для минимизации габаритов поворотного устройства. Для выбора двигателя поворотного устройства произведен расчет динамических характеристик привода. Общий момент сопротивления определялся по формуле:

$$M_c = M_j + M_{тр} + M_F, \quad (1)$$

где M_j – момент инерции вращающихся элементов шлифовальной бабки; $M_{тр}$ – момент трения в направляющих; M_F – момент от действия силы резания.

Также было определено значение угловой критической скорости вращения головки, при котором возникают релаксационные колебания [4]. При вращательном движении зависимость угловой критической скорости имеет вид:

$$\omega_c = \frac{\Delta M}{\sqrt{\psi \cdot k \cdot I}} \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right), \quad (2)$$

где ΔM - разность моментов трения при покое и движении, k - крутильная жесткость привода, I - приведенный момент инерции вращаемого узла.

Для анализа динамических параметров привода была составлена математическая модель механизма поворота шлифовальной головки [5]. Уравнение движения шагового двигателя при пренебрежении явлениями второго порядка имеет вид:

$$M_{\text{двиг}} = I_{\text{двиг}} \frac{d\Omega_{\text{двиг}}}{dt} + M_1; \quad (3)$$

где $M_{\text{двиг}}$, $I_{\text{двиг}}$, $\Omega_{\text{двиг}}$ - момент движения, момент инерции ротора и угловая скорость двигателя, M_1 – момент нагрузки на валу двигателя. С другой стороны, в соответствии с электромеханической характеристикой двигателя:

$$M_{\text{двиг}} = k_d U - k_m \Omega_{\text{двиг}}; \quad (4)$$

где k_d - коэффициент пропорциональности между напряжением U и моментом движения, k_m - коэффициент наклона электромеханической характеристики. Редуктор может быть представлен без инерционным элементом:

$$\Omega_1 = \Omega_{\text{двиг}} k_{\text{ред}}; \quad (5)$$

где Ω_1 - угловая скорость выходного вала редуктора, $k_{\text{ред}}$ - коэффициент передачи.

Уравнение движения вала нагружения:

$$I \frac{d\Omega}{dt} + \lambda \Omega + \beta \left(\int \Omega dt - \int \Omega_1 dt \right) + M = 0, \quad (6)$$

где M , I , Ω - полезный момент, момент инерции и угловая скорость нагрузки, β - крутильная жесткость, λ - коэффициент вязкого трения. Таким образом, уравнение связи показывает на, что тратится полезная часть момента двигателя, и имеет вид:

$$M_1 = k_{\text{ред}} \beta \left(\int \Omega_1 dt - \int \Omega dt \right). \quad (7)$$

По полученной математической модели, которая состоит из уравнений (3-7), построена структурная схема электромеханической системы (рис. 5).

Блок Transfer Fcn2 – передаточная функция упругой системы привода. Общий вид передаточной функции для звеньев данного типа имеет вид:

$$\frac{1}{T_1^2 \cdot s^2 + T_2 \cdot s + 1}. \quad (8)$$

Коэффициенты T_1 и T_2 , можно определить из следующих выражений:

$$T_1 = \frac{1}{\omega_0}, \quad (9)$$

где ω_0 – частота собственных колебаний упругой системы поворотного устройства. Для определения частоты собственных колебаний был проведен расчет динамических характеристик упругой системы привода поворота. Расчетом было определено, что $\omega_0 = 26$ Гц.

$$T_1 = \frac{1}{26,29} = 0,038; T_2 = 2 \cdot \varepsilon \cdot T_1 = 0,069, \quad (10)$$

где ε - параметр затухания колебаний ($\varepsilon = 0,8$). Структурная схема электромеханической системы поворота шлифовальной головки приведена на рисунке 4.

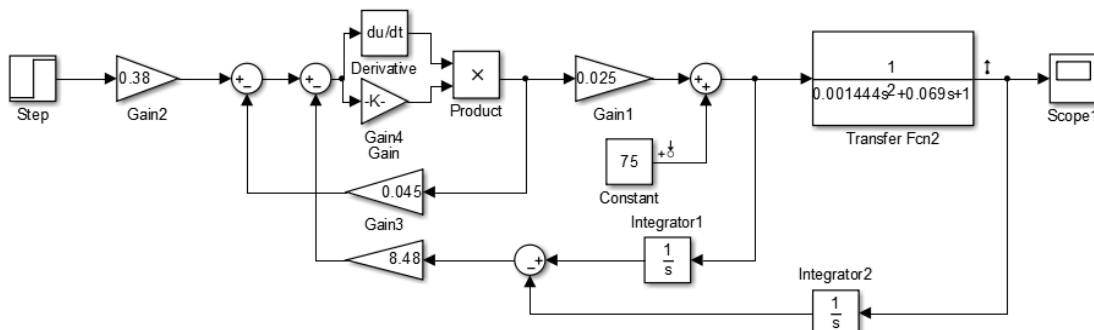


Рисунок 4. Структурная схема электромеханической системы в Matlab Simulink

Было выполнено моделирование поворота шлифовального круга при его движении вдоль параболического участка. Поворот шлифовальной головки проводили дискретно, так как при непрерывном повороте значение критической угловой скорости приводит к возникновению в системе релаксационных колебаний [4].

Дискретное значение угла поворота выбиралось из условия, чтобы погрешность обработки на параболическом участке детали не превышала 0,05 мм. Это составляет четвертую часть от динамической составляющей погрешности обработки (0,2 мм). Вращение шлифовальной головки на параболическом участке заготовки осуществляли через каждые 10 мм. Значение угловой скорости при повороте шлифовальной головки $\omega = 0,0548$ рад/с. Значение критической угловой скорости из условия отсутствия релаксационных колебаний составляет $\omega_c = 0,0283$ рад/с. Таким образом, дискретный поворот шлифовальной головки будет происходить без возникновения релаксационных колебаний.

Переходный процесс в электромеханической системе привода поворота шлифовальной головки представлен на рисунке 5. При повороте шлифовальной головки отсутствует перерегулирование. Установившееся значение достигается за 0,2 сек.

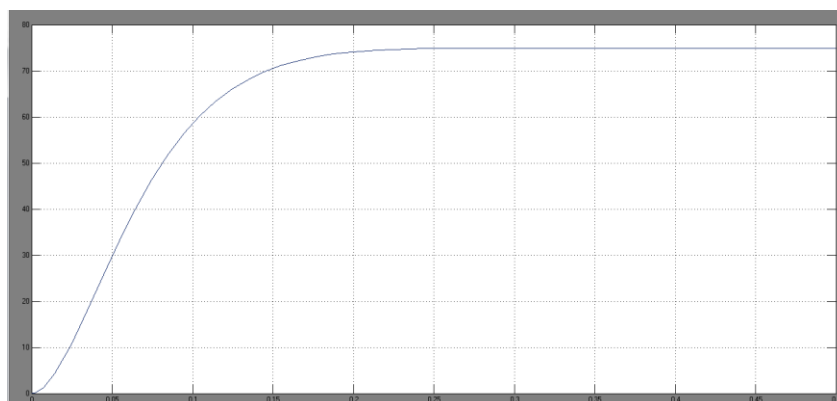


Рисунок 5. Переходный процесс в электромеханической системе

Анализируя график переходного процесса можно сделать выводы об устойчивости системы, что подтверждает АЧХ и ФЧХ объекта (рис. 6).

Анализируя АЧХ и ФЧХ объекта управления было установлено, что запас устойчивости по амплитуде составляет 62 дБ, запас устойчивости по фазе 170°.

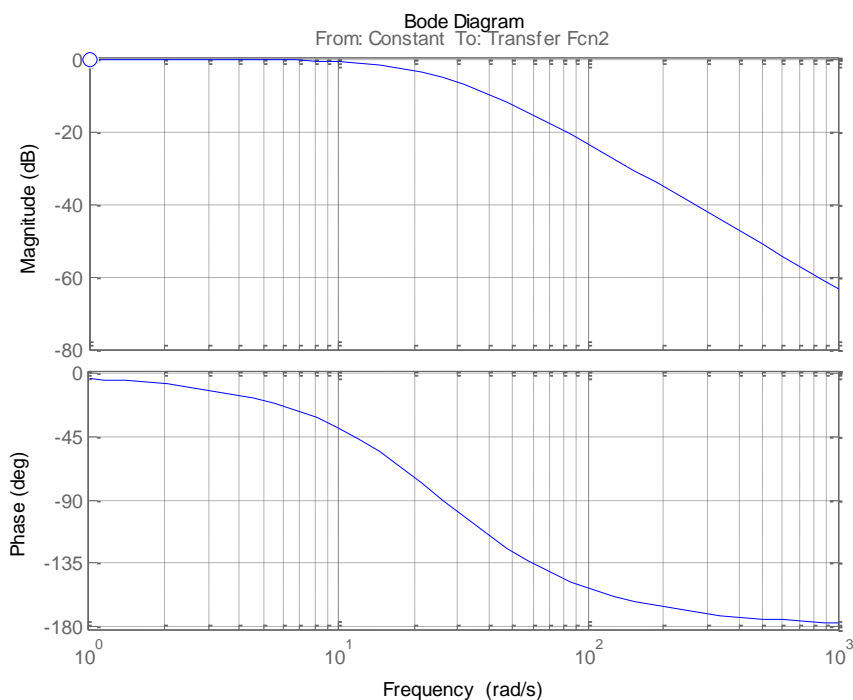


Рисунок 6. АЧХ и ФЧХ электромеханической системы привода

Схема привода поворота шлифовальной головки была реализована в Matlab Simulink (рис. 7). Схема электропривода построена на базе шагового двигателя в пакете SimPowerSystems (блок Stepper Motor).

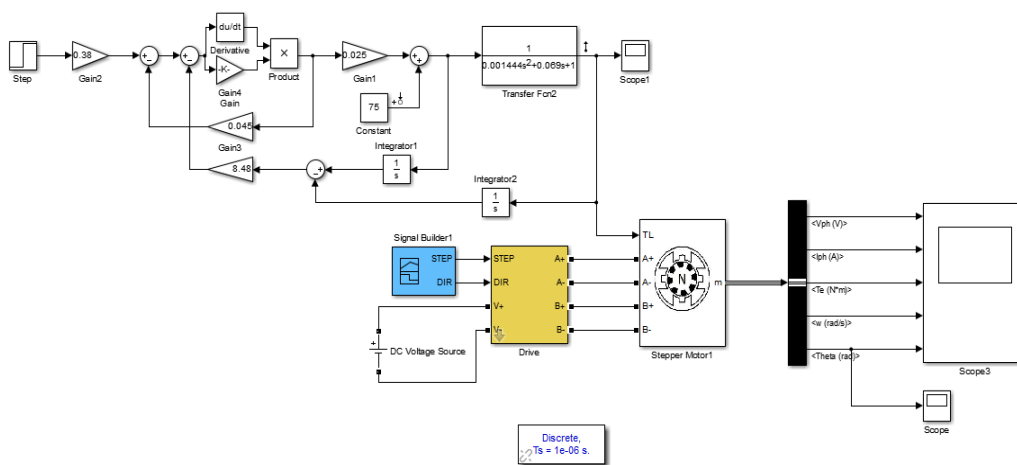


Рисунок 7. Схема привода в Matlab Simulink

Фазы электродвигателя питаются от преобразователей MOSFET (расположенными в блоке Drive), которые подключены к источнику питания постоянного тока. Дискретные токовые сигналы управления генерируются в блоке Signal Builder. График изменения

угла поворота шлифовального круга при обработке параболического участка приведен на рис. 8.

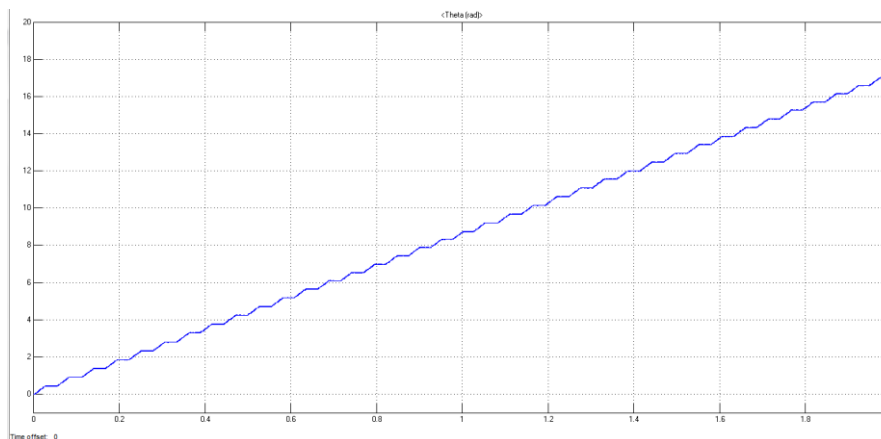


Рисунок 8. График изменения угла поворота шлифовального круга вдоль параболического участка

Заключение. Предложенный вариант конструкции шлифовальной головки устраняет кинематическую погрешность при обработке антенного обтекателя. Построенная математическая модель в Matlab Simulink позволяет произвести анализ динамических параметров привода поворота. Анализ, разработанной математической модели механизма поворота показал быстроедействие и устойчивость процесса поворота шлифовальной головки. При ее применении, погрешность формообразования будет в четыре раза меньше динамической составляющей погрешности обработки при шлифовании обтекателя, которые можно устранить за счет применения систем автоматического управления процессом резания на станках с ЧПУ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гусев, В. В. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с.
2. Суздальцев, Е. И. Радиопрозрачные, высокотермостойкие материалы XXI века // Огнеупоры и техническая керамика. – 2002. – №3. – С. 42-50.
3. Гусев, В. В. Влияние кинематической погрешности шлифования на точность обработки антенных обтекателей / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова, Д. В. Поколенко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 3. – Харків: НТУ «ХПИ», 2009. – С. 231-236.
4. Пуш, В. Э. Малые перемещения в станках / В. Э. Пуш – Ленинград: Госгортехиздат, 1961. – 124с.
5. Петраков, Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням: Навчальний посібник / Ю. В. Петраков – Київ: УкрНДІАТ, 2004. – 383с.

Поступила в редколлегию 14.01.2020 г.

УДК 621.9: 658.5

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ ОПТИМИЗАЦИИ

Представлены результаты оптимизации периода стойкости режущего инструмента по критериям максимальной производительности, минимальной себестоимости и их мультипликативной свертки. Установлены оптимальные периоды стойкости, обеспечивающие наилучшее сочетание критериев производительности и себестоимости. Обоснованы коэффициенты взаимосвязи между оптимальными периодами стойкости, рассчитанными по различным критериям оптимизации.

Ключевые слова: инструмент, стойкость, производительность, себестоимость, оптимизация

T. G. Ivchenko

DETERMINATION OF OPTIMUM CUTTING TOOL LIFE OF THE CUTTING TOOL ON DIFFERENT CRITERIA OF THE OPTIMIZATION

The results of the optimization of the cutting tool life of the cutting tool on the criteria of burst performance, minimum prime price and their multiplicative association are presented. The optimum cutting tool life providing the best combination of criteria of the productivity and prime price are set. The coefficients of intercommunication between of the cutting tool life expected on the different criteria of optimization are grounded.

Keywords: cutting tool, cutting tool life, productivity, prime price, optimization.

1. Введение

Повышение эффективности механической обработки деталей машин является актуальной задачей современного машиностроительного производства. Наиболее успешно эта задача решается на основе оптимизации параметров процессов резания и условий эксплуатации режущего инструмента.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны методы однокритериальной оптимизации режимов резания по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости [1]. В ряде работ обоснована целесообразность многокритериальной оптимизации одновременно по нескольким критериям, в том числе с использованием мультипликативной свертки критериев, позволяющих различные критерии оптимизации привести к единому критерию, обеспечивающему наилучшее сочетание каждого из них [2, 3]. Методика оптимизация режимов резания с использованием метода геометрического программирования, представленная в этих работах, дает аналитическое решение для определения оптимальных режимов резания в зависимости от условий обработки. Однако, в этих работах не решены задачи обоснования оптимального периода стойкости режущего инструмента.

Известно, что решению задачи определения оптимальных режимов резания предшествует задача обоснования оптимального периода стойкости режущего инструмента. Для наиболее распространенных критериев оптимизации - максимальной производительности и минимальной себестоимости установлены аналитические зависимости оптимального периода стойкости режущего инструмента от условий обработки, в том числе и с учетом случайного характера стойкости режущего инструмента [4, 5].

Оптимальные периоды стойкости, рассчитанные по различным критериям, существенно отличаются друг от друга и при обеспечении экстремального уровня одного

из критериев оптимизации, существенно ухудшается другой.

Представляет интерес исследовать возможности использования мультипликативной свертки критериев максимальной производительности и минимальной себестоимости применительно к оптимизации периода стойкости режущего инструмента с обеспечением одновременного улучшения параметров процесса резания по каждому из них.

Цель представляемой работы – совершенствование методики определения оптимального периода стойкости режущего инструмента на основании мультипликативной свертки критериев максимальной производительности и минимальной себестоимости обработки.

2. Основное содержание и результаты работы

При однокритериальной оптимизации в качестве критериев традиционно рассматриваются переменные части производительности и себестоимости обработки, зависящие от режимов резания [4, 5].

Целевые функции, выражающие зависимость критериев производительности $P(T)$ и себестоимости $C(T)$ от параметра оптимизации T , выражаются следующим образом:

$$P(T) = C(T^m + t_c T^{m-1})^{-1}; \quad C(T) = C(T^m + c T^{m-1}), \quad (1)$$

где $C = \pi D L t^{x_v} S^{y_v} V^{-1} / 1000 C_V K_V$, $c = t_c + A'/A$ – постоянные коэффициенты; t_c – время смены инструмента; D – диаметр обрабатываемой поверхности; L – длина обработки; V – скорость резания; S – подача; C_V, K_V – коэффициенты и x_v, y_v, m – показатели, которые характеризуют степень влияния глубины t , подачи S и стойкости T на скорость резания V , определяемые в зависимости от условий эксплуатации; $c = A'/F$; A – стоимость станко-минуты; A' – стоимость инструмента, приведенная к одному периоду стойкости.

Для указанных критериев оптимизации оптимальные по производительности T_{oP} и себестоимости T_{oC} периоды стойкости инструмента определяются известными зависимостями [4, 5]:

$$T_{oP} = (1/m - 1)t_c; \quad T_{oC} = (1/m - 1)(t_{\tilde{n}} + c). \quad (2)$$

Для сравнительного анализа различные целевые функции - производительности и себестоимости целесообразно представить в относительном виде, приняв в качестве базы для сравнения значения этих функций при оптимальных по каждому из критериев периодах стойкости инструмента:

$$K_P(T) = \frac{P(T)}{P_{max}(T_{oP})} = \frac{(T^m + t_c T^{m-1})^{-1}}{(T_{oP}^m + t_c T_{oP}^{m-1})^{-1}} = \frac{(T^m + t_c T^{m-1})^{-1}}{\left[\left(\frac{1}{m} - 1 \right)^{m-1} \frac{t_c^m}{m} \right]^{-1}}. \quad (3)$$

$$K_C(T) = \frac{C(T)}{C_{min}(T_{oC})} = \frac{(T^m + cT^{m-1})}{(T_{oC}^m + cT_{oC}^{m-1})} = \frac{(T^m + cT^{m-1})}{\left[\left(\frac{1}{m} - 1 \right)^{m-1} \frac{(t_c + c)^m}{m} \right]} \quad (4)$$

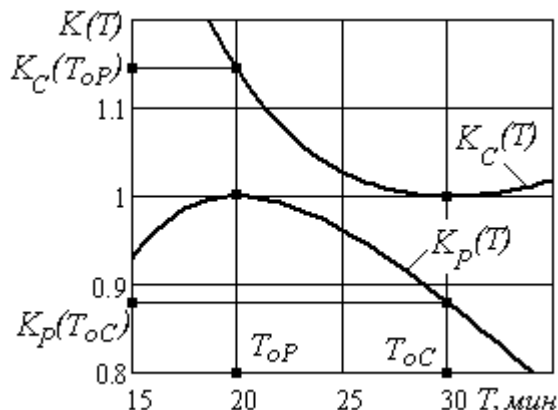


Рисунок 1. Зависимости относительных целевых функций производительности и себестоимости обработки от периода стойкости инструмента

Графики изменения относительных целевых функций (3), (4) в зависимости от периода стойкости инструмента (рис. 1) иллюстрируют наличие экстремумов: минимума у функции себестоимости $K_C(T)$ и максимума у функции производительности $K_P(T)$.

Оптимальный по себестоимости период стойкости T_{oC} обеспечивает минимум себестоимости ($K_C(T_{oC}) = 1$), но снижает производительность в 1,14 раза ($K_P(T_{oC}) = 0,88$). Оптимальный по производительности период стойкости T_{oP} обеспечивает максимум производительности ($K_P(T_{oP}) = 1$), но повышает себестоимость в 1,15 раза ($K_C(T_{oP}) = 1,15$). То есть при обеспечении экстремального уровня одного из критериев, существенно ухудшается другой.

Графики построены для следующих условий: $m = 0,2$; $t_c = 5$ мин; $c = 2,5$ мин ($A' = 5$ коп, $A = 2$ коп/мин).

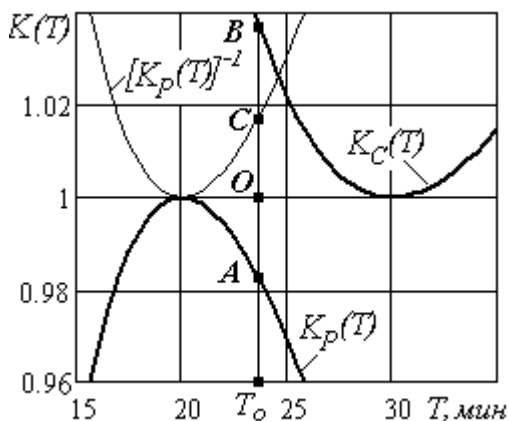


Рисунок 2. К оценке минимальных потерь относительных целевых функций производительности и себестоимости в зависимости от периода стойкости инструмента

Относительная функция потерь $F(T)$ в зависимости от периода стойкости T может быть выражена следующим образом:

$$F(T) = \frac{K_C(T) - K_P(T)}{K_P(T)} \quad (5)$$

Минимальных потерь каждой из относительных целевых функций - производительности и себестоимости можно достичь, когда сумма их отклонений от 1 в некоторой точке T_o (рис. 2) будет минимальной ($AO + OB \rightarrow \min$):

$$(K_C(T_o) - 1) + (1 - K_P(T_o)) = K_C(T_o) - K_P(T_o) \quad (6)$$

Учитывая, что $AO = OC$ выражение (6) можно заменить следующим:

$$(K_C(T_o) - 1) + \left([K_P(T_o)]^{-1} - 1 \right) = K_C(T_o) + [K_P(T_o)]^{-1} - 2 \quad (7)$$

Такая замена позволяет аналитически вычислить оптимальное значение периода стойкости T_o , обеспечивающее экстремум полученной функции (7), что будет обеспечивать также и экстремум функции потерь (5), исходя из условия:

$$\frac{d(T^m + t_c T^{m-1} + k(T^m + c T^{m-1}))}{dT} = 0; k = \frac{C(T_{oC})}{P(T_{oP})} = \left(1 + \frac{c}{t_c}\right)^m. \quad (8)$$

$$T_o = \left(\frac{1}{m} - 1\right) \left[t_c + c \left(1 + \left(1 + \frac{c}{t_c}\right)^m\right)^{-1} \right]. \quad (9)$$

Для обеспечения наилучшего сочетания критериев производительности и себестоимости, исходя из функции потерь $F(T)$ и исключая постоянные величины, целесообразно использовать критерий оптимизации, представляющий собой мультипликативную свертку критериев, а именно – отношение критериев себестоимости и производительности, для каждого из которых потери будут минимальными. В этом случае целевая функция имеет вид:

$$M_{PC}(T) = \frac{C(T)}{P(T)} = \frac{(T^m + c T^{m-1})}{(T^m + t_c T^{m-1})^{-1}}. \quad (10)$$

Для указанной целевой функции оптимальный период стойкости, обеспечивающий ее минимум – $T_{oM} = T_o$ (9).

В том случае, когда функция производительности рассматривается без учета вспомогательного времени на смену инструмента, мультипликативная свертка критериев производительности и себестоимости $N_{PC}(T)$, а также оптимальный период стойкости T_{oN} , обеспечивающий ее минимум, определяются следующим образом:

$$N_{PC}(T) = \frac{(T^m + c T^{m-1})}{(T^{-m})}; T_{oN} = \left(\frac{1}{2m} - 1\right)(t_{\bar{n}} + c). \quad (11)$$

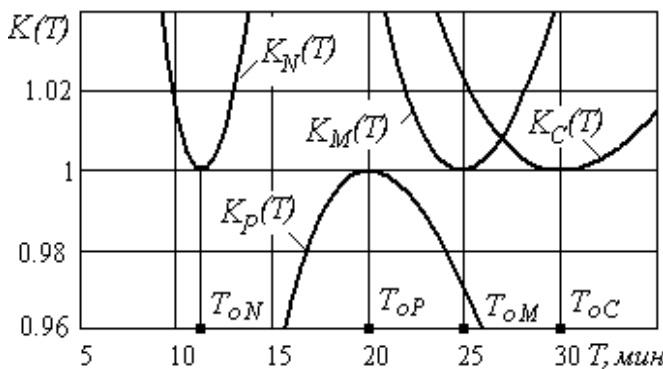


Рисунок 3. Зависимости различных относительных целевых функций от периода стойкости инструмента

Графики изменения относительных целевых функций в зависимости от периода стойкости инструмента (рис. 3) иллюстрируют наличие минимума у мультипликативных сверток функций себестоимости и производительности $K_M(T) = M_{PC}(T)/M_{PC}(T_{oM})$ и $K_N(T) = N_{PC}(T)/N_{PC}(T_{oN})$.

Для указанных ранее условий оптимальные по различным критериям периоды стойкости инструмента: $T_{oC} = 30$ мин; $T_{oM} = 24,8$ мин; $T_{oP} = 20$ мин; $T_{oN} = 11,3$ мин.

Взаимосвязи между оптимальными периодами стойкости, рассчитанными по различным критериям оптимизации

ции, могут быть определены с помощью коэффициентов $k_i = T_{oi}/T_{обаз}$. Если в качестве базового оптимального периода стойкости $T_{обаз}$ принимается период стойкости, оптимальный по критерию себестоимости, то коэффициенты $k_N = T_{oN}/T_{oC}$, $k_P = T_{oP}/T_{oP}$, $k_M = T_{oM}/T_{oM}$ определяют снижение различных оптимальных периодов стойкости в сравнении с периодом, оптимальным по себестоимости.

$$k_N = \frac{T_{oN}}{T_{oC}} = \left(\frac{1}{2m} - 1\right)(t_c + c) / \left(\frac{1}{m} - 1\right)(t_c + c) = \frac{2m-1}{2(m-1)};$$

$$k_P = \frac{T_{oP}}{T_{oC}} = \left(\frac{1}{m} - 1\right)t_c / \left(\frac{1}{m} - 1\right)(t_c + c) = 1 / \left(1 + \frac{c}{t_c}\right);$$

$$k_M = \frac{T_{oM}}{T_{oC}} = \left[1 + \frac{c}{t_c} \left(1 + \left(1 + \frac{c}{t_c}\right)^m\right)^{-1}\right] / \left(1 + \frac{c}{t_c}\right).$$

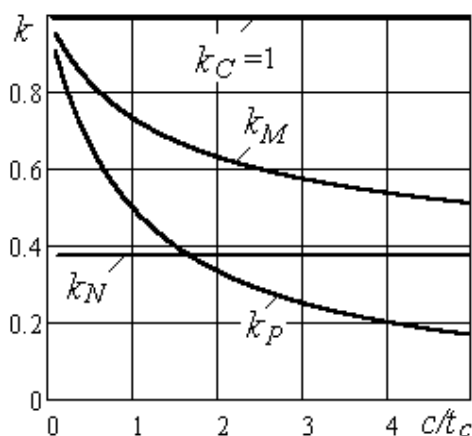


Рисунок 4. Зависимости коэффициентов снижения оптимальных по различным критериям периодов стойкости инструмента от параметра c/t_c

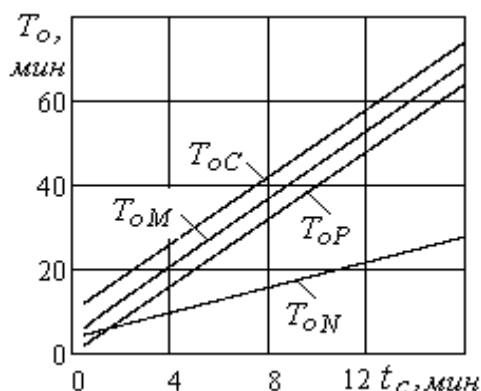


Рисунок 5. Зависимости оптимальных по различным критериям периодов стойкости инструмента от времени его смены

Графики изменения установленных коэффициентов снижения оптимальных по различным критериям оптимизации периодов стойкости инструмента в зависимости от безразмерного параметра c/t_c ($c = A'/A$ - соотношение стоимости одного периода стойкости инструмента A' , стоимости станко-минуты A , и времени смены инструмента t_c) представлены на рис. 4.

С увеличением параметра c/t_c разница между различными оптимальными периодами стойкости и оптимальным периодом по себестоимости существенно увеличивается. При этом оптимальные периоды стойкости снижаются, обеспечивая для прочих равных условий более высокий уровень критерия оптимизации. Увеличение параметра c/t_c может быть достигнуто за счет снижения времени смены инструмента t_c , а также снижения стоимости одного периода стойкости инструмента или увеличения стоимости станко-минуты.

Установленные коэффициенты (12) позволяют для любых условий эксплуатации режущего инструмента на основании периода стойкости, оптимального по себестоимости, определять оптимальные периоды для любых критериев оптимизации.

Для указанных ранее условий коэффициенты снижения оптимальных по различным критериям оптимизации периодов стойкости инструмента в сравнении с периодом стойкости, оптимальным по себестоимости ($c/t_c = 0,5$): $k_N = 0,38$; $k_P = 0,67$; $k_M = 0,83$; $k_C = 1$.

При эксплуатации инструмента в заданных

условиях, когда в формулах оптимальных периодов стойкости (2), (9), (11) показатель относительной стойкости t и параметр c постоянны, основной влияющий на оптимальные периоды параметр - время смены инструмента.

Графики зависимости оптимальных периодов стойкости от времени смены инструмента представлены на рис. 5.

Для всех рассмотренных критериев оптимизации (1), (10), (11) время смены инструмента весьма существенно влияет на оптимальные периоды стойкости и прямо пропорционально их увеличивает.

При выборе режущих инструментов предпочтение следует отдавать быстро-сменным инструментам с минимально возможным временем их восстановления. Это обеспечит более низкий уровень оптимальных периодов стойкости инструмента и позволит за счет увеличения при этом режимов резания, их обеспечивающих, достичь более высокой производительности и более низкой себестоимости обработки.

Выводы. Таким образом, на основании выполненных исследований обосновано существование критериев оптимизации, обеспечивающих наилучшее сочетание критериев производительности и себестоимости и представляющих собой мультипликативную свертку этих критериев, а именно – отношение критериев себестоимости и производительности.

Впервые установлены аналитические зависимости оптимальных периодов стойкости инструмента от параметров процесса резания по мультипликативному критерию, обеспечивающие минимальные потери производительности и себестоимости при эксплуатации режущего инструмента.

Обоснованы коэффициенты взаимосвязи между оптимальными периодами стойкости инструмента, рассчитанными по различным критериям оптимизации.

Представленная методика позволяет для любых условий обработки выполнять расчеты оптимальных периодов стойкости по различным критериям, в том числе по мультипликативным критериям, обеспечивающим наилучшее сочетание критериев максимальной производительности и минимальной себестоимости обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. - М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
2. Ивченко, Т. Г. Использование мультипликативных критериев при оптимизации режимов резания / Т. Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА. - 2012. - № 30. – С. 325 - 330.
3. Петряева, И. А. Оптимизация режимов чистового точения на основании мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости / И. А. Петряева, Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: – Донецк: ДонНТУ. - 2016. - № 1 (52). – С. 146 - 150.
4. Ивченко, Т. Г. Оптимизация режимов резания с учетом случайного характера стойкости режущего инструмента // Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ. - 2017. - №4 (59). – С. 24 - 30.
5. Михайлов, А. Н. Научно-обоснованная оптимизация стойкости режущего инструмента по критерию себестоимости. / А. Н. Михайлов, Т. Г. Ивченко, // Научные технологии в машиностроении. - Брянск: БГТУ. - 2018. - № 5. – С. 3 - 9.

Поступила в редколлегию 12.01.2020 г.

УДК 621.793

А. И. Комаров, канд. техн. наук, **М. А. Белоцерковский**, д-р техн. наук, доцент,
И. А. Сосновский, **Д. В. Орда**, **А. А. Курилёнок**, канд. техн. наук
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, РБ,
Тел.: 284-15-42, факс: 284-08-90, E-mail: sos3@tut.by;

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ СИЛУМИНА АК12, НАНЕСЕННЫХ НА СТАЛЬНУЮ ОСНОВУ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

В статье представлены результаты металлографических и триботехнических исследований композиционной втулки, полученной совмещением метода центробежного формования с индукционным нагревом при наплавке силумина АК12 на стальную основу. Удовлетворительные адгезионные свойства между наплавленным покрытием и стальной основой обеспечивались за счет введения в состав шихты дополнительного материала для формирования переходной зоны между покрытием и стальной основой, в качестве которого использовали баббит марки Б83С. Согласно полученным данным, на границе раздела фаз формируется переходная зона состоящая из сплава АК12 и олова, насыщенная включениями железа и сурьмы, тогда как на стальной поверхности образуется алитированный слой. Результаты триботехнических испытаний показали, что полученное покрытие из сплава АК12 обладает более низким коэффициентом трения (0,031–0,037), чем покрытие из бронзы БрОФ10-1, при равном уровне интенсивности изнашивания

Ключевые слова: центробежная индукционная наплавка, АК12, переходный слой, структура адгезионные свойства, коэффициент трения

A. I. Komarov, M. A. Belotserkovsky, I. A. Sosnovsky, D. V. Orda, A. A. Kurilyonok

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ANTI-FRICTION COATINGS FROM SILUMIN ALSI12, APPLIED ON THE STEEL BASIS BY THE CENTRIFUGAL INDUCTION METHOD

The article presents the results of metallographic and tribotechnical studies of a composite sleeve obtained by combining the centrifugal molding method with induction heating when welding silumin AK12 onto a steel base. Satisfactory adhesive properties between the deposited coating and the steel substrate were ensured by introducing additional material into the charge composition to form a transition zone between the coating and the steel substrate, using B83C grade babbitt. According to the data obtained, at the phase boundary a transition zone is formed consisting of an alloy of AK12 and tin, saturated with inclusions of iron and antimony, while an aluminized layer is formed on the steel surface. The results of tribotechnical tests showed that the obtained AK12 alloy coating has a lower coefficient of friction (0.031–0.037) than the BrOF10-1 bronze coating with an equal level of wear rate

Keywords: centrifugal induction surfacing, AlSi12, transition layer, structure, adhesive properties, friction coefficient

1. Введение

Повышение конструкционной прочности, надежности и долговечности высоконагруженных узлов трения является актуальной проблемой для современного машиностроения. При этом особое значение придается повышению надежности и долговечности трибосопряжений, эксплуатирующихся в условиях как низких, так и высоких удельных механических нагрузок, сопряженных с тепловыми воздействиями. Зачастую такие узлы эксплуатируются под действием постоянных нагрузок при трении без смазочных материалов или в условиях ограниченной смазки.

Как показывают мировые научные тенденции [1-4], данная проблема может быть решена путем использования композиционных материалов на металлической ос-

нове, обладающих уникальным сочетанием таких свойств, как относительно высокая твердость, жесткость, прочность, теплопроводность, а также вязкость разрушения.

Так для деталей триботехнического назначения необходимым сочетанием свойств обладают металломатричные композиционные материалы, которые представляют собой пластичную матрицу с равномерно распределенной упрочняющей фазой в виде тонкодисперсных или ультра- и нанодисперсных твердых включений [1-6]. Однако, изготовление таких изделий сопряжено с высокими затратами, поэтому большой интерес представляют изделия с покрытиями из антифрикционных композиционных материалов [7-12].

К числу таких перспективных композитных материалов можно отнести изделия, в которых на стальную основу наносится функциональное покрытие на основе медных или алюминиевых сплавов и их композитов [7-8]. С учетом энергоэффективности существующих процессов наплавки [9-12], при получении таких покрытий, целесообразно использовать технологию электротермической наплавки, к разновидности которой относится индукционная наплавка.

Целью работы является разработка технологических подходов, обеспечивающих получения композиционных втулок с высокой адгезией материала покрытия из алюминиевого сплава АК12 и стальной основы, при центробежной индукционной наплавке.

2. Материалы и методика исследования

В качестве материала для наплавки покрытия был выбран алюминиево-кремниевый сплав АК12 (ГОСТ 1583-93), поскольку он имеет повышенный уровень литейных и механических свойств, а также обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью при температурах до 200 °С. Состав сплава АК12 приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Состав сплава АК12 (в мас.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Mg	Zn	Al
10-13	до 1.5	до 0.6	до 0.5	до 0.01	до 0.1	до 0.3	ост.

Высокий процент кремния (10-13 мас.%) в сплаве обеспечивает хорошую жидкотекучесть и литейные свойства (дает малую усадку и практически не образует трещин), позволяя понижать температуру литья, а также делает сплав АК12 более теплоустойчивым и износостойким, по сравнению с бронзой. При этом за счет малого интервала кристаллизации, отливки из сплава АК12 обладают небольшой пористостью.

Формирование антифрикционного покрытия на внутренней поверхности цилиндрической стальной заготовки проводилось совмещением метода центробежного формования предварительно подготовленной шихты с нагревом токами высокой частоты до температуры 780–800 °С, с последующей изотермической выдержкой при данной температуре в течение 6 мин. С целью обеспечения хороших адгезионных свойств между стальной основой и наплавляемым покрытием из силумина АК12, в состав шихты вводился материал обеспечивающий формирование переходной зоны.

В качестве материала переходной зоны был выбран оловянистый баббит Б83С (таблица 2), поскольку основной его компонент – олово, то его взаимная растворимость с алюминием и с железом низкая, но при этом он способен обеспечить высокие адгезионные характеристики. С железом олово образует интерметаллид типа FeSn₂ (при вы-

соких концентрациях железа), что способствует повышению адгезионных свойств за счет образования диффузионной зоны.

Таблица 2. – Состав сплава Б83С (ГОСТ 13220-74), в мас. %.

Sb	Cu	Pb	Fe	As	Zn	Al	Sn
9.0-11.0	5.0-6.0	1.0-1.5	0.1	0.1	0.01	0.005	ост.

Таким образом, состав шихты для наплавки был следующим: материал покрытия – силумин АК12, материал для формирования переходной зоны – баббит Б83С, а также смеси порошков флюсующих материалов. Количество материала рассчитывалось таким образом, чтобы обеспечить толщину наплавляемого слоя 5–6 мм.

Индукционная центробежная наплавка осуществлялась на оборудовании, включающем генератор токов высокой частоты (ТВЧ) типа ЛПЗ-2-67М, мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный индуктор, программный регулятор ТРМ 151 (ООО «Овен»), инфракрасный пирометр TemPro-2200 и установку центробежной индукционной наплавки (конструкции ОИМ НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения до 3000 мин⁻¹. Температура нагрева контролировалась пирометром TemPro-2200, время нагрева контролировалось электронным секундомером ИВПР-203М ТУ 4282-001-33865949-2009. При наплавке шихта размещалась в полости стальной втулки, изготовленной из стали 20 (ГОСТ 1050-88). Для последующих исследований полученные образцы подвергались токарной обработке (рис. 1).



Рисунок 1. Образец с наплавленным покрытием из сплава АК12

Структурно-фазовое состояние полученных образцов и поверхностей трения исследовались методом металлографического анализа на микроскопах ХМ300 и МИМ-8, оснащенных цифровой регистрацией изображений. Микротвердость алюминиевого покрытия композиционных образцов определялась на приборе ПМТ-3 путем вдавливания алмазного индентора, согласно требованиям ГОСТ 9450-76. В зависимости от размера исследуемых структурных фаз нагрузка составляла 0,196 или 0,49 Н.

Триботехнические испытания образцов проводились на многофункциональном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments, США) по схеме возвратно-поступательного перемещения образца (рис. 2) относительно неподвижного стального контртела, в

качестве которого использовался торец стального ролика из сплава ШХ15 (твердость 60-62 HRC) диаметром 3 мм. Испытание проводилось при давлениях (p) 10, 20 и 30 МПа. Амплитуда перемещения составляла 5 мм с частотой 10 Гц. Длительность испытания в нагруженном состоянии составляла 2 часа. По результатам испытаний определялся коэффициент трения (f), массовый износ Δm , интенсивность изнашивания Iq ($Iq = \Delta m/L$, где L – суммарный путь трения), а также суммарный линейный износ пары трения. Потеря массы Δm образцов определялась путем взвешивания на аналитических весах ВЛР-200.

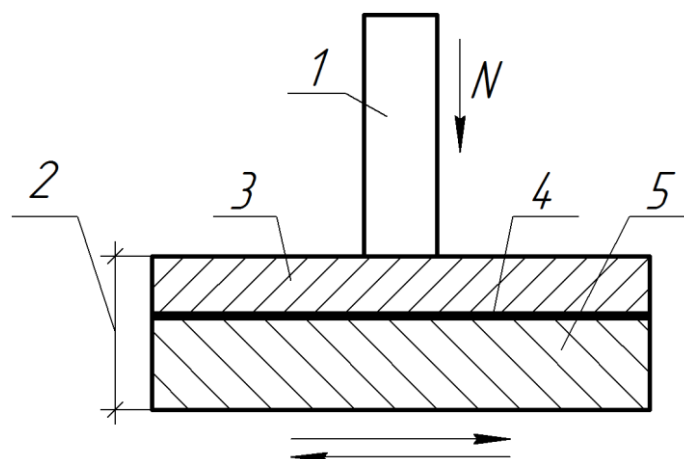


Рисунок 2. Схема триботехнических испытаний образцов
 N – направление прикладываемой нагрузки; 1 – контртело; 2 – образец;
 3 – покрытие из сплава АК12; 4 – переходный слой; 5 – стальная основа

3. Результаты эксперимента и их обсуждение.

Результаты металлографических исследований. Металлографический анализ структуры покрытия из сплава АК12 проводился по всей толщине функционального слоя начиная от рабочей поверхности и до стальной основы (рис. 3).

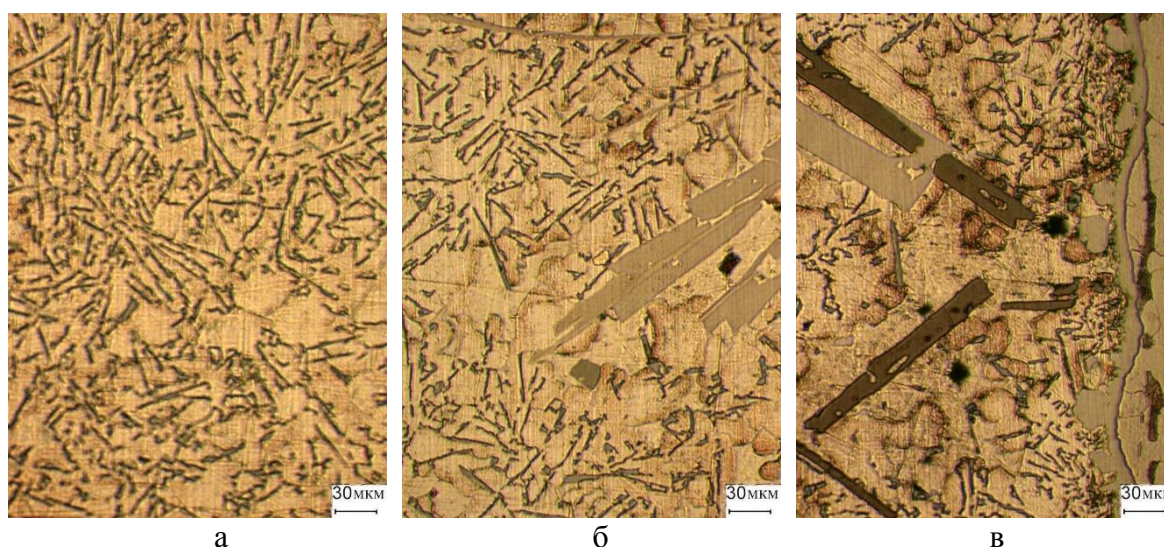


Рисунок 3. Структура основных зон наплавленного покрытия из сплава АК12

На основании полученных данных можно выявить три основные зоны: основная – сплав АК12 (рис. 3а), переходная зона у границы раздела фаз покрытия со стальной основой (рис. 3б и 3в) и диффузионный подслоя на стальной втулке (рис. 3в).

Основная доля наплавленного покрытия (около 60% от толщины наплавленного слоя) имеет эвтектическую структуру и представлена равномерно распределенными иглами кремния в α -твердом растворе алюминия. В структуре присутствуют также области твердого раствора, которые идентифицированы как скопления оловянного сплава (рис. 4б). Согласно результатам сканирующей микроскопии (рис. 4) и рентгеноспектрального анализа, участки скопления олова легированы свинцом и сурьмой (рис. 4в и 4г). Указанные области имеют неравномерное распределение по структуре сплава, что связано с оттеснением более тяжелого сплава к стальной подложке под действием центробежных сил.

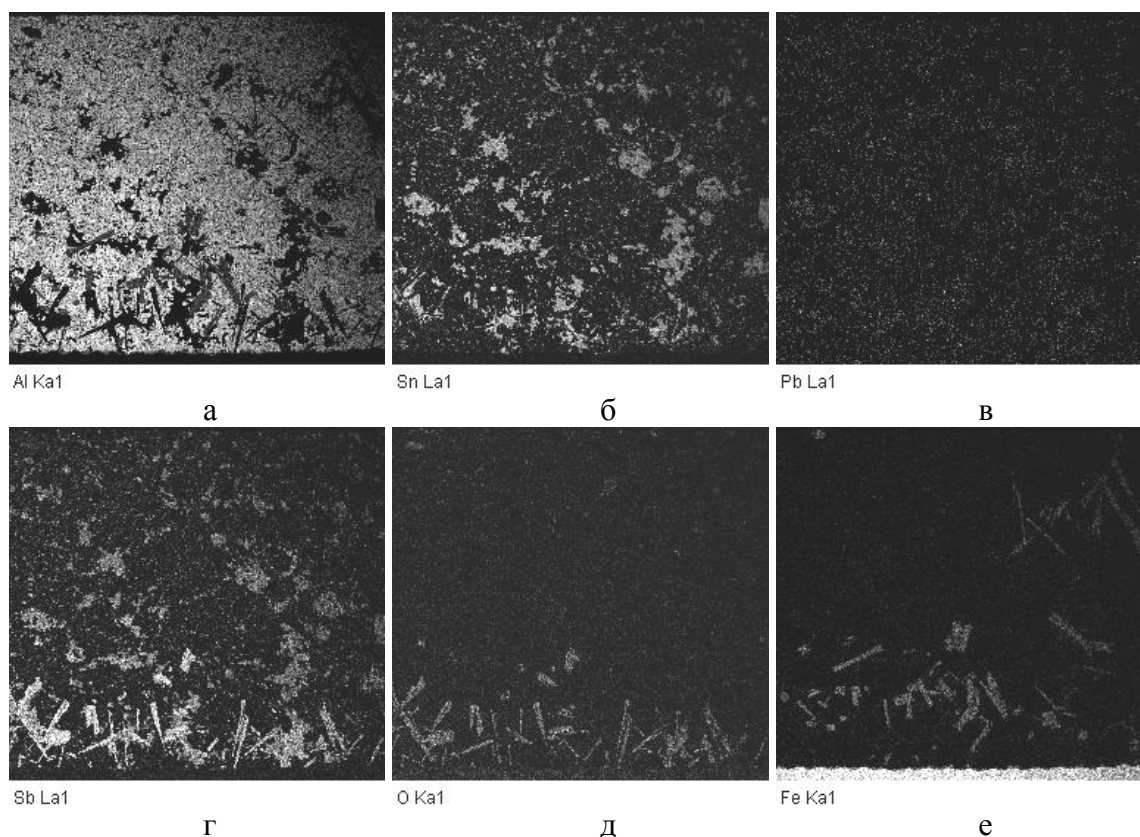


Рисунок 4. Распределение по структуре наплавленного слоя основных компонентов сплава

Структура переходной зоны включает помимо Al-Si эвтектики включения двух видов: железо- и сурьмасодержащих. Обе фазы представляют собой крупные вытянутые частицы длиной до 150 мкм и шириной до 30 мкм (рис. 3б и 3в). Согласно картам распределения, включения сурьмы содержат в своем составе кислород (рис. 4д) и располагаются ближе к стальной основе, оттесняя железосодержащие включения к середине наплавленного покрытия (рис. 4е).

Формирование железосодержащих включений происходит за счет растворения поверхностного слоя стальной втулки, а именно при растворении алитированного слоя (спектр 5–6, рис. 5, таблица 3), толщина которого составляет 6–8 мкм. На поверхности диффузионного слоя формируются сферические частицы системы Al-Fe-Si-Cu, которые

по достижении некоторого критического размера переносятся в расплав, растворяются в нем и насыщают железом (спектр 7–8, рис. 5, таблица 3). В результате чего, при кристаллизации расплава происходит формирование железосодержащих включений.

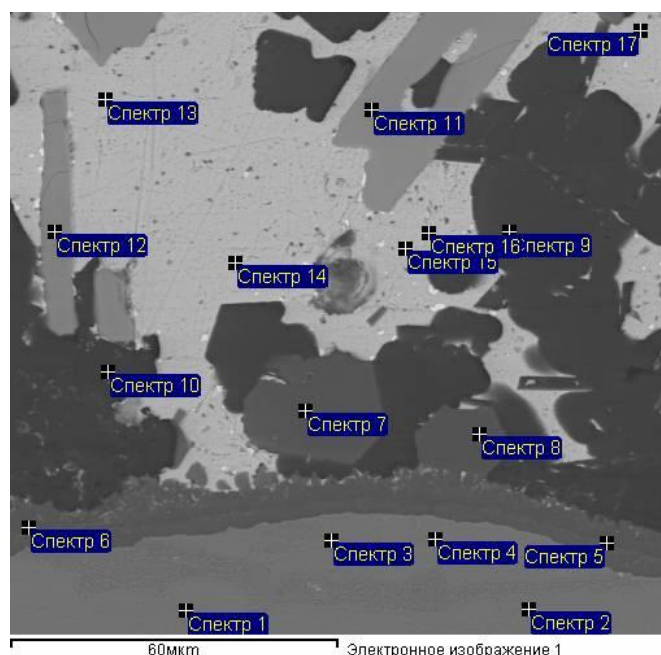


Рисунок 5. Структура наплавленного покрытия на границе раздела со стальной втулкой

Таблица 3. – Химический состав структурных фаз наплавленного покрытия на границе раздела со стальной втулкой

№ спектра	C	O	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Sn	Sb	Pb
Спектр 1-4	10,4-16,0				0,4-0,7	83,3-89,2				
Спектр 5-6	19,8-22,4		32,2-42,4	9,6-10,8		28,2-34,6				
Спектр 7-8	20,5-23,0		40,5-41,8	10,0-10,2		26,3-27,1	0,2-0,4			
Спектр 9-10	29,8-30,9		66,9-68,4	0,4-0,6			1,2-1,6			
Спектр 11-12	7,4-8,2	17,6-19,2	12,3-12,4						60,1-61,9	
Спектр 13-17	4,3-7,3		0,4-0,7					88,4-93,4		1,9-3,6

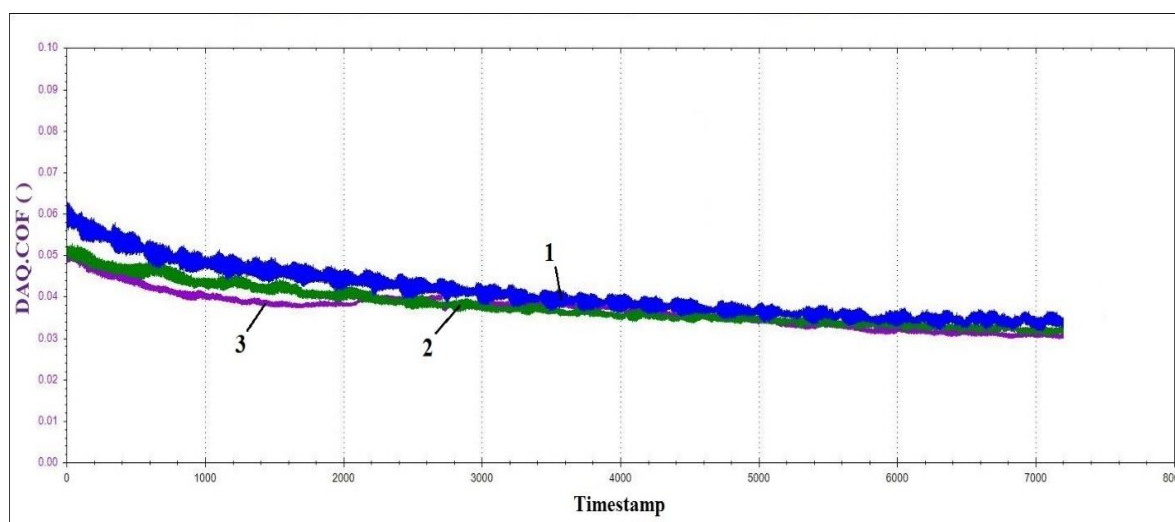
Согласно представленным данным, баббит не образует четкой переходной зоны (с явной границей раздела фаз) между наплавляемым покрытием из алюминиевого сплава АК12 и стальной втулкой. Однако формируемый на границе раздела фаз подслои, с высоким содержанием интерметаллидных включений и олова, беспечивает близкие коэффициенты термического расширения, снижая внутренние напряжения и

обеспечивая достаточно высокие адгезионные свойства между наплавленным покрытием и стальной втулкой.

Результаты дюрометрических и триботехнических испытаний. Согласно результатам дюрометрических испытаний, микротвердость основной структурной фазы, Al-Si эвтектики, варьируется в диапазоне 700–750 МПа, тогда как микротвердость железосодержащих включений изменяется от 5,5 до 7 ГПа. Таким образом, при достаточном количестве в структуре твердых включения будет соблюдаться принцип Шарпи, что обеспечит в процессе трения более высокие триботехнические свойства наплавленного материала.

Перед проведением триботехнических исследований образцов, втулки с полученными покрытиями подвергалась механической обработке для удаления дефектного слоя, после чего из них вырезались и шлифовались образцы для триботехнических испытаний. В результате такой обработки триботехнические испытания проводили на образцах, структура которых сочетала Al-Si эвтектику с включениями железосодержащих частиц (рис. 3б).

Согласно полученным данным, коэффициент трения покрытия в исследуемом диапазоне давлений практически не зависит от нагрузки и варьируется в диапазоне 0,031–0,037 (рис. 6).



1 – 10 МПа; 2 – 20 МПа; 3 – 30 МПа

Рисунок 6. Изменение коэффициента трения наплавленного покрытия в ходе триботехнических испытаний при различных давлениях

При увеличении давления происходит снижение времени приработки сопрягаемых поверхностей, при этом суммарный линейный износ на всех давлениях также не изменяется и равен 2,05–2,25 мкм/ч (рис. 7). Как видно из графика, основная доля износа протекает на этапе приработки образца. Средняя величина интенсивности изнашивания образца после испытаний при давлениях исследуемого диапазона, равна $4,6 \cdot 10^{-5}$ мг/м, что сопоставимо с данными для бронзового сплава БрОФ10-1.

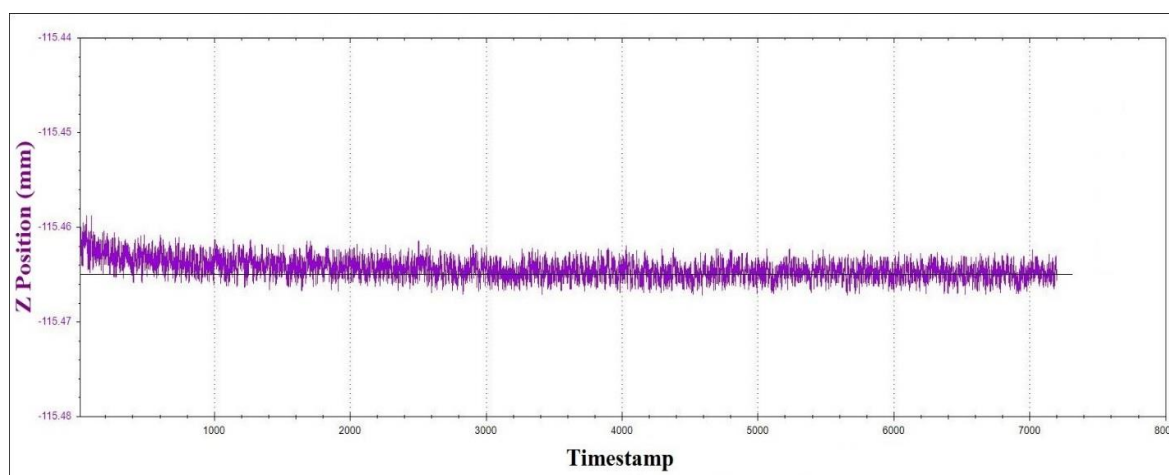


Рисунок 7. Изменение положения датчика нагрузки за период испытаний образца с наплавленным покрытием при давлении 30 МПа

Основываясь на результатах испытаний, можно заключить, что покрытие из сплавов алюминий-кремниевой группы можно рассматривать в качестве замены бронзового покрытия при эксплуатации в триботехнических узлах, работающих при давлениях до 30 МПа.

4. Заключение

Разработаны технологические подходы для получения композиционных втулок с покрытием из сплава АК12, при которых адгезионные свойства между наплавленным слоем и стальной основой обеспечиваются введением в шихту материала, формирующего переходную зону. Согласно проведенным исследованиям, в качестве такого материала может быть использован баббит марки Б83С, который обеспечивает удовлетворительные адгезионные свойства как с силумином, так и со стальной основой.

Согласно данным структурного анализа, введение бabbита приводит к частичному растворению железа, которое при кристаллизации выделяется в форме включений вытянутой формы, твердость которых достигает 7 ГПа.

Триботехнические испытания показали, что коэффициент трения сплава АК12 с включениями железосодержащих частиц в 2 раза ниже, чем у бронзы БрОФ10-1, и составляет 0,031–0,037 при равном уровне интенсивности изнашивания. Таким образом, композиционные втулки с покрытием из сплава АК12 могут использоваться в качестве альтернативы бронзовым втулкам в узлах триботехнического назначения, работающих при давлениях до 30 МПа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михеев, Р. С. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники / Р.С. Михеев, Т. А. Чернышова. – Москва: ООО ИПЦ "Маска", 2013. – 356 с.
2. Borodianskiy, K. Mechanical Properties and Microstructure Characterization of Al-Si Cast Alloys Formation Using Carbide Nanoparticles / Konstantin Borodianskiy, Michael Zinigrad // Journal of Materials Sciences and Applications. – 2015. – Vol. 1, No 3. – P. 85–90.

3. Verresh Kumar, G. B. Studies on Al6061-SiC and Al7075-Al₂O₃ metal matrix composites / G.B. Verresh Kumar, C.S.P. Rao, N. Selvaraj, M.S. Bha-gyashakar // Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineer-ing. – 2010. – Vol. 9, No. 1. – P. 43–55.

4. Properties of ceramic-reinforced aluminum matrix composites – a review / Dipti Kanta Das, Purna Chandra Mishra, Saranjit Singh, Ratish Kumar Thakur // International Journal of Mechanical and Materials engineering, 2014. – Vol. 1, No 12. – P. 1–16.

5. Комаров, А. И. Синтез наноструктурированных тугоплавких наполнителей, их влияние на структуру и свойства силуминов / А. И. Комаров // Перспективные материалы и технологии: монография: в 2 т.; под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО "ВГТУ", 2015. – Т.2 – Гл. 12. – С. 202–223.

6. Комаров, А. И. Синтез карбидо-корундового наполнителя и его воздействие на структуру и свойства поршневого сплава АК12М2МгН / А. И. Комаров, В. И. Комарова, Д. В. Орда // Механика машин, механизмов и материалов, 2016. – №1 (34). – С. 81 - 86.

7. Белявин, К. Е. Импульсные электрофизические технологии получения покрытий и модифицирования поверхности материалов / К. Е. Белявин, Д. В. Минько, О.О. Кузнечик, В. В. Макеев // Металлургия. Респ. межвед. сб. науч. трудов, 2013. – Вып. 34, ч. 2. – С. 58 - 71.

8. Пат. 2017586 РФ, МКИ5 В 22 F 7/04. Способ изготовления биметаллических изделий: / Дорожкин Н. Н., Кашицин Л. П., Сосновский И. А., Гафо Ю. Н.; заявитель Ин-т проблем надежности и долговечности машин АН БССР. – № 4902218/02; заявл. 14.01.91; опубл. 15.08.94. Бюл. № 15.

9. Белявин, К. Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К. Е. Белявин, И. А. Сосновский, А. Л. Худoley. // Вестник фонда фундаментальных исследований. — Минск, 2013. – № 3 (36). – С. 70 - 87.

10. Сосновский, И. А. Термические параметры центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий / И. А. Сосновский, Ю. Н. Гафо // Инженерно-физический журнал. – Т. 84 – 2011. – № 6. – С. 1135–1142.

11. Белявин, К. Е. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К. Н. Белявин [и др.]. – Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.

12. Сосновский, И. А. Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых покрытий, содержащих наноразмерные модификаторы / И. А. Сосновский [и др.] // Вестник ПГУ, 2016. – Серия В. – № 3. – С. 66 - 74.

Поступила в редколлегию 18.01.2020 г.

УДК 621.9

¹А. В. Костенко, канд. техн. наук, доц., ²А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.

¹Камчатский государственный технический университет, Россия

²Донецкий национальный технический университет, ДНР

Тел./Факс: +7 (984) 1637436; E-mail: andr13kost@list.ru

ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО РЕСУРСА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

В статье рассмотрена проблема обеспечения требуемого ресурса судовых дизелей и их элементов. Показана зависимость ресурса от критериев предельного состояния деталей. Критерий предельного состояния может быть выбран из технического, функционального, экономического и утилизационного. Выбор критерия предельного состояния определяется особенностями действующей на элемент дизеля эксплуатационной функции. Приведены классификации деталей судовых дизелей и процессов, вызывающих изменение технического состояния. Обоснованное установление критерия предельного состояния дает возможность решения задачи обеспечения заданного ресурса.

Ключевые слова: ресурс заданный, критерий предельного состояния, условия эксплуатации, структура, судовой дизель, деталь, функциональный элемент.

A. V. Kostenko, A. N. Mikhaylov

SELECTION OF LIMIT STATE CRITERIA OF PARTS TO ENSURE THE REQUIRED RESOURCE OF SHIP DIESEL

The article considers the problem of providing the required resource for marine diesels and their elements. The dependence of the resource on the criteria for the limiting state of parts is shown. Limit state criterion can be selected from the technical, functional, economic and disposal. The choice of the limit state criterion is determined by the features of the operational function acting on the diesel element. Classifications of parts of marine diesel engines and processes causing a change in technical condition are given. Justified establishment of the limit state criterion makes it possible to solve the problem of providing an assigned resource.

Keywords: assigned resource, limit state criterion, operating conditions, structure, marine diesel, part, functional element.

1. Введение

Обеспечение требуемого уровня надежности и долговечности изделий, в том числе и сложных, является одной из основных задач, стоящих перед машиностроением. Это в полной мере относится и к судовым дизелям. Наметившиеся тенденции в машиностроении и в эксплуатации судовых агрегатов определяют перспективность создания агрегатов с единым заданным ресурсом. Сложность производства таких агрегатов заключается в том, что они состоят из большого количества составляющих различной степени сложности, что указывает на необходимость обеспечения равного ресурса всех элементов. Однако, для сложных технических систем, к которым относятся судовые дизели, целесообразнее ставить задачу создания не одинаковых, а кратных ресурсов составных элементов дизеля [1].

Решение этой задачи возможно при использовании функционально-ориентированного подхода (ФОП) [2] при проектировании технологических процессов (ТП) изготовления деталей судовых дизелей.

2. Анализ публикаций

Одной из первых работ, в которой указывается проблема обеспечения равной надежности деталей агрегата, является работа [3]. В работах [4-6] на основе анализа со-

временного состояния машиностроения указывается актуальность решения задачи обеспечения требуемой надежности агрегатов: более гибкое и многономенклатурное производство; сокращение жизненного цикла изделия; стратегия ремонта оборудования по отработанному ресурсу. В работах [7-9] также рассмотрены различные аспекты этой проблематики. В частности, в работе [7] решена проблема организационно-технологического обеспечения оптимальной долговечности машин, в диссертации [8] обеспечено соответствие ресурса компрессорного и турбинного колес турбокомпрессора, в работе [9] предложено решение проблемы управления надежностью газотурбинных двигателей для самолетов в рамках обеспечения безопасности полетов. Кроме того, в работах [10,11] указывается на необходимость увязки проектируемой долговечности изделий машиностроения с экономически обоснованным ресурсом.

3. Основное содержание и результаты работы

Обеспечение равной надежности для всех элементов дизеля является сложной задачей в связи с тем, что детали отличаются по функциональному назначению и по условиям эксплуатации, что предопределяет использование различных материалов, а также различных технологических процессов изготовления, в том числе и различных методов отделочно-упрочняющей обработки.

Технический ресурс, являясь запасом возможной наработки изделия, определяется рядом свойств [7]:

$$R = f(G, F, X, K, S, E), \quad (1)$$

где G, F, X, K – геометрические, физические, химические и конструктивные свойства составных частей изделия машиностроения; S – качество сборки; E – эксплуатационные факторы.

Ресурс неразрывно связан с предельным состоянием, которое должно однозначно характеризоваться критерием предельного состояния (КПС), зависящего от условий эксплуатации – действия эксплуатационных функций (ЭФ). Проблема создания изделий с заданным ресурсом является комплексной и должна быть рассмотрена в рамках жизненного цикла изделия (рис. 1).



Рисунок 1. Жизненный цикл изделия

Научно обоснованное определение КПС позволяет назначить необходимый ресурс не только детали, но и агрегата в целом, что позволит решить основную задачу – наиболее полное использование заложенных в деталь эксплуатационных свойств, т.е. выработку ресурса, но с учетом обеспечения минимальных эксплуатационных затрат.

Отметим, что проблема выбора КПС напрямую влияет на структуру ТП, на выбор средств и методов технологического обеспечения.

КПС K может быть выбран из четырех возможных (рис. 2, выражение (2)):

- технического КПС (K_t), определяющего возможность работы изделия без поломок;
- функционального КПС (K_f), гарантирующего выполнение изделием целевой функции с требуемым уровнем качества;
- экономического КПС (K_e), определяющего экономическую целесообразность эксплуатации изделия;
- утилизационного (K_u), учитывающий возможности утилизации изделия.

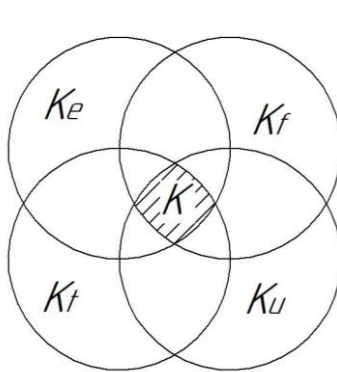


Рисунок 2. Диаграмма образования множества, характеризующего критерий K

Представленную на рис. 2 диаграмму можно выразить математически:

$$K = K_t \cap K_f \cap K_e \cap K_u . \tag{2}$$

Ресурс судового дизеля и ресурсы его элементов должны быть увязаны зависимостью

$$R_D = m_i R_{D_i} = m_{i+1} R_{D_{i+1}} = \dots + m_z R_{D_z}, \tag{3}$$

где m_i – коэффициент кратности ресурса i -го элемента судового дизеля (узла, детали, функционального элемента детали; R_D – ресурс судового дизеля.

С учетом (2) и (3) функция преобразования φ_0 ПКС элементов дизеля в соответствующие им ресурсы с учетом кратности ресурсу всего дизеля записывается следующим образом

$$\varphi_0 : \left\{ \begin{matrix} K_i \\ K_{i+1} \\ \dots \\ K_z \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} m_i R_D \\ m_{i+1} R_D \\ \dots \\ m_z R_D \end{matrix} \right\} . \tag{4}$$

Выражение (4) предопределяет структуру технологического процесса на базе ФОР, реализующего такие технологические преобразования заготовки в изделия совокупными технологическими воздействиями материального, энергетического и информационного типов, которые позволяют производить агрегаты с заданным ресурсом.

Безусловно, наличие большого количества элементов судового дизеля, различий в их условиях эксплуатации создает большие трудности при проектировании ТП на базе ФОР. К тому же, количество элементов возрастает многократно при делении деталей дизеля на функциональные элементы по уровням глубины технологии. Для каждого из этих элементов необходимо провести анализ действия ЭФ, выбрать КПС, увязать про-

изводство всех элементов на базе общего подхода – создания агрегата с единым или кратным ресурсом его элементов. Все это приводит к возникновению задач большой размерности. Использование методов декомпозиции и композиции элементов позволяет формализовать и упростить описанные процессы.

Поскольку судовой ДВС представляет собой техническую систему, состоящую из элементов, взаимодействующих между собой непосредственно или опосредованно, его (ДВС) можно представить в виде дерева признаков построения объектов на основе функциональных отношений, как это показано на рис. 3 [12].

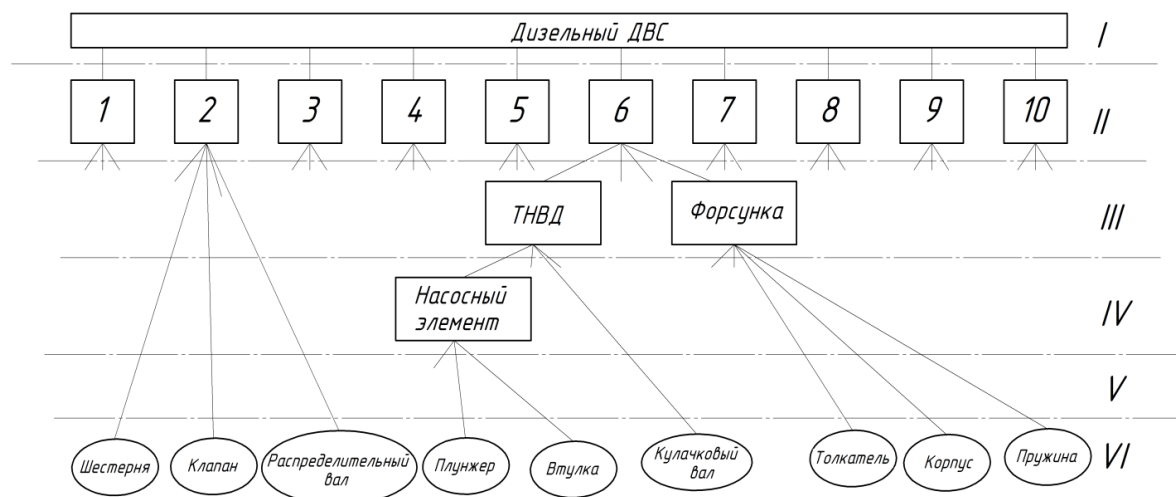


Рисунок 3. Иерархическая структура ТС дизельного ДВС:

1 – остов; 2 – механизм газораспределения; 3 – кривошипно-шатунный механизм; 4 – система охлаждения; 5 – система смазки; 6 – топливная система; 7 – система воздухообеспечения; 8 – система управления; 9 – система газоотвода; 10 – система регулирования и контроля, уровни иерархии: I – техническая система; II – подсистемы и механизмы; III – узлы; IV, V – сборочные единицы; VI – детали.

Принципиально структурную модель судового дизеля Str^{CD} можно представить в виде следующего выражения

$$Str^{CD} = \bigcup_{i=1}^n Str_i, \tag{5}$$

где Str_i – это принципиально структурные модели элементов ДВС, которые могут быть представлены на разных уровнях иерархии: подсистемы и механизмы; узлы, сборочные единицы, детали. С учетом особенностей ФОРТ под Str_i также могут быть представлены структурные модели деталей, состоящих из функциональных элементов на разных уровнях глубины технологии (деталь, часть, составляющая, зона, макрозона, микрозона, нанозона.)

ДВС и каждый его элемент функционирует в определенных условиях. Поэтому его состояние в каждый момент времени эксплуатации можно представить в виде вектора состояний, возможные значения которого находятся в некотором множестве состояний G из всех возможных состояний, входящих в множество D (рис. 4): $G \in D$.

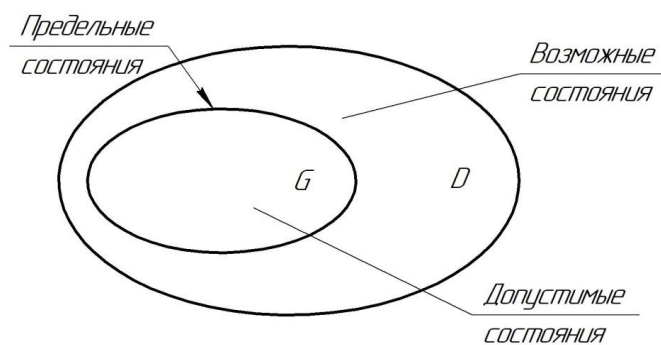


Рисунок 4. Состояния детали при эксплуатации

Согласно [13] типичными критериями предельных состояний объектов могут быть:

- отказ одной или нескольких составных частей, восстановление или замена которых на месте эксплуатации не предусмотрены эксплуатационной документацией;
- механический износ ответственных деталей (узлов) или снижение физических, химических, электрических свойств материалов до предельно допустимого уровня;
- снижение наработки на отказ (повышение интенсивности отказов) объектов ниже (выше) допустимого уровня;
- превышение установленного уровня текущих (суммарных) затрат на техническое обслуживание и ремонты или другие признаки, определяющие экономическую нецелесообразность дальнейшей эксплуатации.

Критериями предельных состояний дизелей могут быть допустимые износы деталей, потеря мощности, увеличение расходов топлива и масла, допустимые деформации, уровень колебаний и пр.

Отдельно следует отметить одну из важнейших характеристик деталей – прочность. Очевидно, что в начале эксплуатации каждый элемент судового дизеля обладает некоторой исходной прочностью, которая была заложена на этапе конструирования и реализована при изготовлении. При эксплуатации из-за действия эксплуатационных функций происходят процессы, снижающие прочность, что выражается в появлении усталостных разрушений, трещин, прогаров, статических разрушений, заеданий, коррозий, наклепов, износов и др.

В данном случае в качестве КПС может выступать некоторая остаточная прочность, достижение которой и является исчерпанием ресурса (рис. 5).

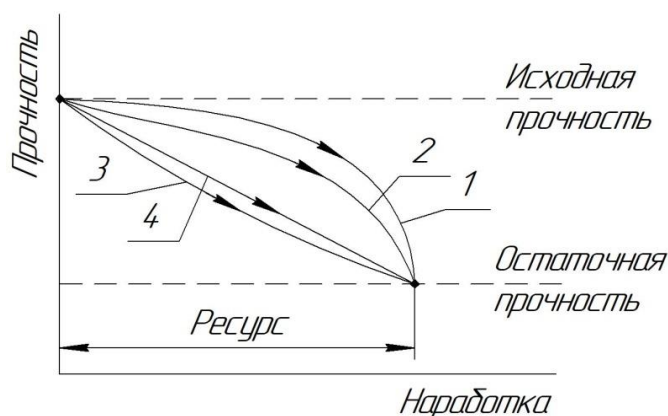


Рисунок 5. Изменение прочности в зависимости от наработки

На рис. 5 показаны траектории достижения четырьмя деталями, входящими в один узел, предельного состояния, т.е. исчерпание ресурса. При этом показан вариант, к которому следует стремиться при реализации параметров качества деталей в процессе изготовлении для обеспечения единого ресурса. Необходимо таким образом обеспечить технологические воздействия на заготовки, чтобы обеспечить их одинаковый ресурс, т.е. единый ресурс узла, с учетом различной интенсивности потери прочности при эксплуатации каждой из деталей, входящих в узел. Отметим, что такой подход возможен и для отдельной детали, функциональные элементы которой подвергаются воздействию различных эксплуатационных функций. В этом случае рис. 5 характеризует единый ресурс всей детали с учетом одинаковых ресурсов каждого функционального элемента.

С одной стороны, судовой дизель представляет собой структурную модель, с другой стороны, двигатель в целом и его детали работают в определенных условиях эксплуатации, представляющих собой комплекс различных эксплуатационных функций, воздействующих на элементы двигателя и, соответственно, изменяющие их техническое состояние. Совокупность эксплуатационных функций можно также представить в виде структурной модели, аналогично выражению (5):

$$EF = \bigcup_{i=1}^n EF_i, \tag{6}$$

где EF_i – это структурные модели эксплуатационных функций, которые могут быть представлены в виде воздействий на элементы дизеля на разных уровнях иерархии. С учетом особенностей ФОТ под EF_i также могут быть представлены воздействия, действующие на функциональные элементы деталей на разных уровнях глубины технологии.

Очевидно, что выбор КПС предопределяется особенностями действующей на элемент дизеля эксплуатационной функции, что позволяет представить это в виде следующего отображения

$$\left\{ \begin{matrix} EF_i \\ EF_{i+1} \\ \dots \\ EF_z \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} K_i \\ K_{i+1} \\ \dots \\ K_z \end{matrix} \right\}. \tag{7}$$

С учетом вышеизложенного можно перейти к синтезу принципиально-структурных модели, определяющей взаимосвязь элемента дизеля и соответствующей ему эксплуатационной функции, а, значит, и КПС. Для этого необходимо выполнить операции декомпозиции объемно-пространственной структурной модели судового ДВС и структурной модели эксплуатационных функций на элементарные структуры Str_{ik}^{CD} и эксплуатационных функций EF_{ik} , а затем объединения соответствующих элементарных структур Str_{ik}^{CD} и эксплуатационных функций EF_{ik} в упорядоченные пары и далее объединения этих упорядоченных пар в общую принципиально-структурную модель.

На рис. 6 показано процедуру синтеза принципиально-структурной модели в схематическом виде. Разделение (декомпозиция) множеств Str_i^{CD} и EF_i должно производиться до тех пор, пока они не будут расчленены на простые элементы, которые можно представить множествами:

$$\begin{cases} Str_i^{CD} = Str_{ik}^{CD}, Str_{ik}^{CD}, \dots, Str_{ik}^{CD}; \\ EF_i = EF_{ik}, EF_{ik}, \dots, EF_{ik}. \end{cases} \tag{8}$$

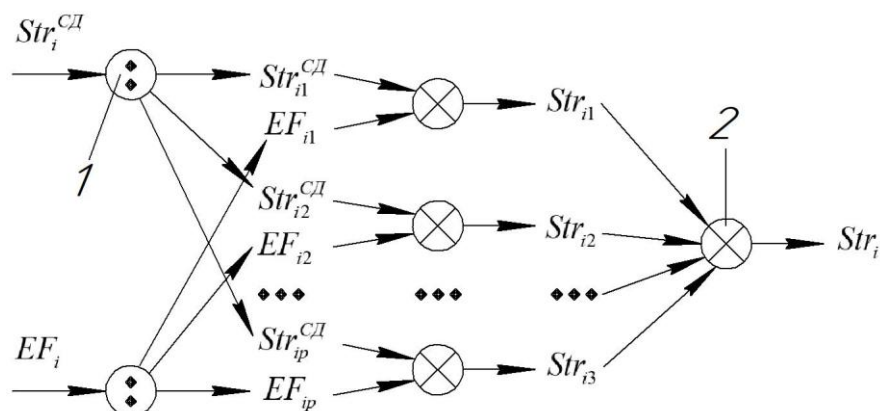


Рисунок 6. Процедура синтеза принципиально-структурной модели:
 1 – знак (оператор) декомпозиции; 2 – знак (оператор) композиции.

Далее, выполняется объединение элементов множеств (8) в упорядоченные пары (кортежи). После чего реализуется объединение кортежей в принципиально-структурную модель, которая может быть представлена множеством кортежей

$$Str_i = \{Str_{i1}, Str_{i2}, \dots, Str_{ip}\}. \tag{9}$$

При синтезе принципиально-структурных моделей выполняется двойная композиция элементов кортежей и кортежей в общую модель. При этом управляемыми переменными являются структурные параметры Str_i^{CD} и EF_i .

Описанная процедура синтеза принципиально-структурной модели применима в условиях проектирования функционально-ориентированного технологического процесса, согласно особенностям которого, деталь представляется набором функциональных элементов (ФЭ) на различных уровнях глубины технологии. Каждый ФЭ, при этом, характеризуется характеристиками класса более высокого уровня технологии, характеристиками качества самого элемента и эксплуатационными функциями:

$$G = F(S, V, EF),$$

где S – множество классифицируемых объектов; V – свойства классифицируемых объектов, характеризующие их с точки зрения качества; EF – эксплуатационные функции; F – функционал, выражающий характеристики классифицируемых объектов.

В связи с этим, в систему классификации деталей, с помощью которой будет осуществляться группирование деталей в соответствии с требуемыми критериями, необходимо ввести характеристику, учитывающую особенности условий эксплуатации. Поскольку для большинства деталей, определяющим является процесс изнашивания, то особенности износа и могут быть классификационным критерием, характеризующим долговечность деталей. Это позволяет разделить детали судовых дизелей на пять групп:

1 группа. Детали, для которых определяющим является коррозионно-механический или молекулярно механический износ – втулки цилиндров, поршни, поршневые кольца и др.

2 группа. Детали, для которых определяющим является износ вследствие пластической деформации – шлицевые детали, шестерни, шпоночные пазы и др.

3 группа. Детали, для которых определяющим является усталостная прочность – шатуны, коленчатый вал, втулки цилиндров и др.

4 группа. Детали, для которых определяющим является абразивный износ. Отметим, что для судовых дизелей абразивный износ происходит из-за попадания грязи,

из-за твердых частиц в масле или из-за прорыва газов, в которых могут быть отколовшийся нагар или сажа.

5 группа. Детали, для которых определяющим является эрозионный износ.

Отметим, что в судовых дизелях есть детали, для которых свойственно наличие разных видов эксплуатационных функций, что позволяет относить их к различным группам. Это, прежде всего, коленчатый вал, втулка цилиндров, поршень, зубчатые колеса и ряд других. Такие детали относятся к тяжелонагруженным, и именно к ним необходимо применять функционально-ориентированный подход при проектировании технологических процессов изготовления или ремонта. Поэтому при анализе таких деталей с точки зрения условий эксплуатации необходимо выполнять деление их на ФЭ на разных уровнях глубины технологии. При этом деление необходимо вести до тех пор, пока для конкретного ФЭ будет определена соответствующая эксплуатационная функция, которая, в свою очередь, будет однозначно определять КПС.

При этом, продвижение «вглубь» детали будет требовать более точного определения процессов, обуславливающих износ и поломку деталей. Приведем классификацию таких процессов, влекущих изменение состояния и свойств ФЭ деталей по [3]:

- действие повторно-переменных напряжений при больших циклах перемен нагрузок, работающих в нормальных условиях;
- действие повторно-переменных напряжений при больших циклах перемен нагрузок, работающих в условиях коррозионных сред;
- действие высоких температур (прижоги), химических и физических процессов;
- контактная усталость с образованием микротрещин, оспин, шелушения и других дефектов;
- механический (главным образом абразивный) износ, механическое выламывание частиц, пластическое деформирование;
- молекулярно-механические процессы;
- коррозионные процессы, сопровождаемые механическими процессами.

Процессы критического износа и зарождение процессов разрушения ФЭ деталей начинаются в особых зонах и участках изделия, а также микро- и макрозонах. Это предопределяет особенности их работы, к которым можно отнести:

- неравномерность распространения деформаций растяжения, сжатия, сдвига (среза), кручения, изгиба, а также объемных и сложных комбинированных деформаций;
- неравномерность и местное действие контактных деформаций;
- краевые эффекты, кромочные контакты и деформации смятия;
- местные концентраторы напряжений;
- повторно-переменные деформации;
- ударные нагрузки;
- неравномерное изнашивание в пространстве и во времени.

Используя приведенные классификации процессов, влекущих изменение технического состояния, можно определить соответствующие критерии предельного состояния, назначить их величины, исходя из обеспечения требуемого ресурса детали и сборочной единицы.

4. Заключение

Решение задачи создания судовых дизелей с деталями, у которых требуется обеспечить заданный ресурс, возможно с обоснованным установлением критерия предельного состояния. Последний, в свою очередь, определяется условиями эксплуатации и должен быть определен для функционального элемента детали на таком уровне тех-

нологии, которая позволит однозначно определить действующую эксплуатационную функцию. При этом выбор критерия осуществляется из четырех возможных: технического, функционального, экономического и утилизационного.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Особенности обеспечения функционально-ориентированных технологий изготовления деталей судовых дизелей / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №4. – С. 31-36.
2. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
3. Елизаветин, М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э. А. Сателъ – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
4. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
5. Силич, А. А. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов: учебное пособие / А. А. Силич. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. – 92 с.
6. Костенко, А. В. Объектно-ориентированное проектирование в машиностроении / А. В. Костенко // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й междунар. науч.-практ. конф. (22-25 мая 2019 г): Т. 3. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 54-58.
7. Говоров, И. В. Организационно-технологическое обеспечение оптимальной долговечности машин: – дис. ... доктора технических наук: 05.02.08, 05.02.22 / И. В. Говоров. – Брянск, 2009. – 326 с.
8. Пичко А.П. Синтез технологического обеспечения комплексного повышения ресурса лопаток турбокомпрессора газотурбинных установок нефтегазовой промышленности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. П. Пичко. – Донецк: 2019. – 20 с.
9. Сарычев, С. В. Методологические основы оценки технических рисков системы управления безопасностью полетов при проектировании, производстве и серийной эксплуатации ГТД: дис. ... доктора техн. наук / С. В. Сарычев. – Рыбинск: 2017. – 485 с.
10. Петрушин, С. И. Организация жизненного цикла изделий машиностроения: монография / С. И. Петрушин, Р. Х. Губайдулина. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 200 с.
11. Дорохов, А. Ф. Качество и надежность судовых дизелей / А. Ф. Дорохов // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технологии. – 2015. – №2. – С. 48-53.
12. Михайлов, А. Н. К вопросу о применении функционально-ориентированного подхода в судовом машиностроении [Электронный ресурс] / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей технологии и виброволновых технологий: сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., почетного профессора ДГТУ А.П. Бабицева (Ростов-на-Дону, 27-28 февраля 2018г.); Донской гос. техн. ун-т. –Электрон. Тестовые дан. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – Режим доступа: <http://www.ntb.donstu.ru/content/201871-ЭБС ДГТУ>. – Загл. с экрана. С. 180-182.
13. ГОСТ 27.003-2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. – Взамен ГОСТ 27.003-90; введ. 01-09-2017. - М.: Стандартинформ, 2018. – 19 с.

Поступила в редколлегию 02.02.2020 г.

УДК 621.793.71

¹Ф. И. Пантелеенко, член -корр. НАН Беларуси, д.т.н., проф., ¹В. А. Оковитый, к.т.н.,
¹О. Г. Девойно, д.т.н., проф., ¹В. А. Сидоров, к.т.н., доцент, ¹В. В. Оковитый,
²В.М. Асташинский, членн.-корр. НАН Беларуси, д. физ.-мат. н., проф.
¹Белорусский Национальный Технический Университет, г. Минск, Беларусь
Тел./Факс+375 17 293-95-99, E-mail: niil_svarka@bntu.by
²Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 220072, Минск,
Беларусь
²Тел./Факс +375 17 284-24-91, E-mail: ast@hmti.ac.by

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ МОДИФИКАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЕРАМИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОБАВОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

В статье изучены и оптимизированы технологические параметры упрочнения высокоэнергетическим плазменным воздействием к напыленным покрытиям из материалов на основе оксидной керамики с использованием добавок тугоплавких металлов. Процессы структурообразования изучались при плавлении, уплотнении и высокоскоростном охлаждении покрытий. Критерием оптимизации режимов является максимальная степень локального плавления и уплотнения напыляемых композиций при отсутствии признаков разрушения покрытия под воздействием излучения.

Ключевые слова: керамическое покрытие, плазменное напыление, утилизация материалов, оптимизация параметров, тугоплавкие металлы

F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devojno, V. A. Sidorov, V. V. Okovity, V. M. Astashinsky

DEVELOPMENT OF PRINCIPLES OF MODIFICATION BY HIGH-ENERGY PLASMA EXPOSURE OF COATINGS FROM CERAMICS WITH THE APPLICATION OF ADDITIVES OF REFINING METALS

In the article technological parameters of hardening of high-energy treatments of sprayed coatings of materials based on oxide ceramics using additives of refractory metals were studied and optimized. The processes of structure formation were studied during melting, compaction, and high-speed cooling of coatings. The criterion for optimizing the regimes is the maximum degree of local melting and compaction of the sprayed compositions in the absence of signs of coating destruction under the influence of radiation.

Keywords: ceramic coating, plasma spraying, material utilization, optimization of parameters, refractory metals

1. Введение

Одной из наиболее часто применяемых порошковых композиций, изготавливаемых методом агломерирования мелкодисперсной порошковой шихты с последующим процессом высокотемпературного спекания, используемой для нанесения износостойких плазменных покрытий, является композиция из диоксида титана-оксида алюминия-плакированная никелем твердая смазка. Тем не менее она характеризуется невысокой износостойкостью и твердость в условиях трения при высоких температурах, низкой гетерогенность покрытий, связанной с неоптимальным соотношением мягкой и твердой составляющих в покрытии [1-3]. Вместе с тем эффективность защитных плазменных покрытий может быть существенно повышена путем модифицирования их структуры при последующей высокоэнергетической обработке нанесенных материалов [4-6].

© Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М.; 2020.

Высокоэнергетические источники энергии (импульсный лазер и компрессионная плазменная установка) имеют свои особенности и преимущества при обработке плазменных покрытий: высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяют обрабатывать необходимый участок покрытия без нагрева всего объема и нарушения его структуры и свойств; возможность управления параметрами воздействия обеспечивает регулирование структуры обрабатываемого слоя, его твердости, шероховатости, износостойкости, геометрических размеров. приводит к значительному уплотнению обрабатываемого слоя покрытия, устраняет пористость, снижает шероховатость [7-9]. Однако следует учитывать, что высокоэнергетическая обработка приводит к перераспределению и изменению напряжений в покрытии, тем более существенному, чем выше мощность излучения и меньше толщина покрытия, поэтому требуется серьезная оптимизация режимов обработки.

Целью наших исследований является создание композиционного керамического материала на основе оксидной керамики с добавлением молибдена, обладающего хорошими технологическими характеристиками, устойчивому к поддержанию химического состава в процессе газотермического напыления и способному формировать плазменные покрытия с высокой износостойкостью, определенной степенью гетерогенности (получение оптимальных соотношений мягкой и твердой составляющих в покрытии), низким коэффициентом трения, с высокой твердостью, износостойкостью, обрабатываемостью.

2. Обработка импульсным лазером плазменных покрытий

В качестве технологического оборудования применяют твердотельный квазистационарный лазерный излучатель. Он позволяет обрабатывать покрытия импульсами лазерного луча длительностью до 4 мс, полученными в режиме свободной генерации. Для оптимизации жестких режимов лазерной обработки необходимо исследовать влияние плотности мощности импульса лазерного излучения на степень оплавления напыленных композиций. При варьировании плотности мощности учитывали, что форма импульсов излучения твердотельных лазеров в режиме свободной генерации определяется формой импульсов тока накачки. Наряду с плотностью мощности оптимизировали суммарное количество импульсов лазерного излучения в пятне обработки. Указанный технологический параметр влияет на толщину обработанных слоев покрытия [1-3].

В таблице 1 представлены результаты оптимизации плотности мощности. Наряду с плотностью мощности импульсного излучения для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий (0,5 – 0,6 мм) оптимизировали суммарное количество импульсов лазерного луча в пятне обработки.

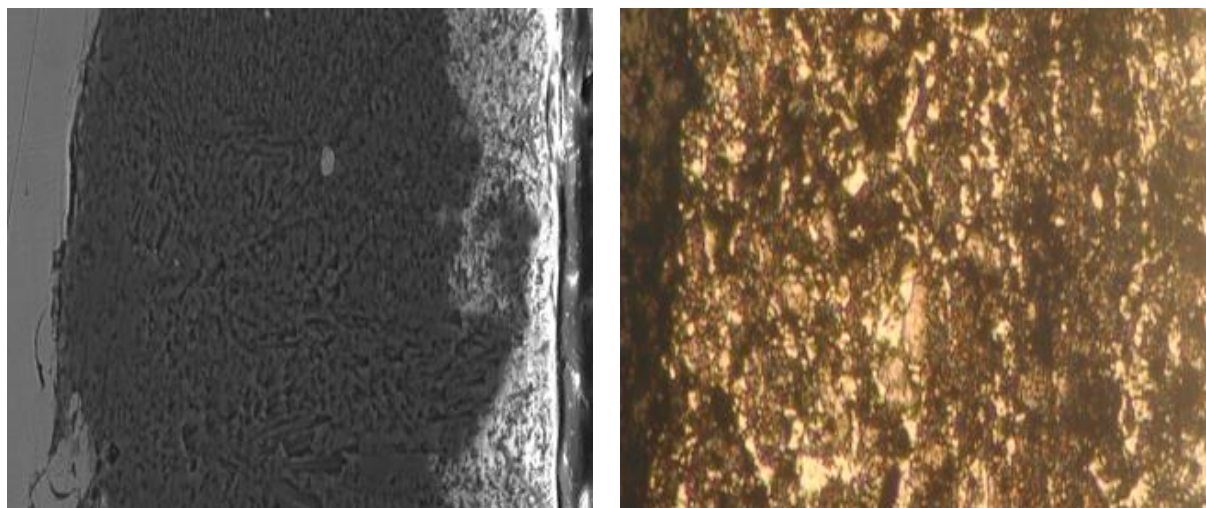
Таблица 1. – Результаты исследований по оптимизации плотности мощности

Покрытие	Плотность мощности импульса лазерного луча, $\times 10^5$ Вт/см ²	Показатель пористости на шлифах обработанного покрытия, %
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -MoS ₂ -Mo	4,0	3,3 – 4,4
	4,5	3,1 – 3,3
	5,5	3,4 – 3,8
	6,0	3,5 – 4,1
	7,0	3,7 – 4,3

Микроструктура покрытий, полученных на оптимизированных режимах обработки, показана на рис. 1а. Как и в случае технологии воздействия импульсами компрессионной плазмы слои покрытий представляют собой оплавленный металлокерамический материал. При оплавлении активизируется химическое взаимодействие на границах основных фаз нанесенных композиций. Продуктами химического взаимодействия могут быть тонкодисперсные (в том числе наноразмерные) образования, которые упрочняют границы основных фаз и покрытие в целом [4-5].

3. Обработка импульсами компрессионного плазменного потока

Обработку напыленных покрытий проводили с помощью газоразрядного квазистационарного ускорителя типа магнитоплазменный компрессор (МПК). Экспериментальный стенд для исследований МПК (рис.2а) состоит из вакуумного блока, включающего камеру с системами откачки и напуска рабочего газа (водорода), энергетического блока, контрольно-измерительного блока, управляющего всеми узлами стенда и синхронизацией между ними, а также диагностического комплекса. Вакуумная камера образована двумя отсеками составляющими единый объем длиной 150 см, в прямоугольном торце которого установлено разрядное устройство МПК. Система подачи рабочего газа включает в себя балластный отсек, что позволяет использовать в качестве рабочего вещества любые газы, а также смешивать их в любом соотношении. Накопитель энергии включает в себя основную секционированную конденсаторную батарею для питания МПК и батарею конденсаторов для питания электродинамического клапана напуска рабочего газа. Общий вид разрядного устройства магнитоплазменного компрессора представлен на рис. 2 б.



а

б

Рисунок 1. Микроструктура покрытия: а – $Al_2O_3-TiO_2-MoS_2-Mo$ после обработки импульсами лазерного излучения; б – $Al_2O_3-TiO_2-MoS_2-Mo$ после обработки импульсами компрессионного плазменного потока (x 500)

элементов. Это способствует увеличению износостойкости нанесенных композиций. На фотографии структуры заметны следы частиц твердых смазок, образующих покрытия. Указанные элементы структуры наблюдается в виде характерных непротравленных (светлых) оболочек. Сохранение структуры распыляемых композиционных частиц в плазменной струе, соударения их с подложкой и после воздействий импульсами плазмы свидетельствует о том, что состав исходных порошков не претерпевает существенных изменений при формировании покрытий.

Таблица 2. – Результаты исследований по оптимизации дистанции обработки

Покрытие	Дистанция обработки, м	Показатель пористости, %
Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -MoS ₂ -Mo	0,09	4,3 – 5,5
	0,08	3,6 – 5,0
	0,07	3,4 – 4,0
	0,06	3,7-4,7
	0,05	Разрушение покрытия

4. Заключение

1. С учетом полученных результатов можно констатировать, что происходит уплотнение напыленных материалов за счет теплового и ударно - волнового воздействий импульсами компрессионного плазменного потока и лазерного излучения. При этом снижается пористость материалов, возрастают когезионная и адгезионная прочности покрытий, происходит измельчение зеренной структуры, формируются аморфные фазы повышенной прочности, о чем свидетельствует увеличение усредненной микротвердости нанесенных композиций.

2. Необходимое и достаточное количество импульсов для покрытий из порошка Al₂O₃-TiO₂-MoS₂-Mo составляет 5-6 воздействий. Дополнительные импульсы неэффективны, так как их многократное повторение ухудшает геометрию поверхности покрытия из-за теплового разрушения. Суммарное количество импульсов лазерного излучения значительно меньше в сравнении с импульсами плазменной струи (11 - 12) при воздействиях на те же покрытия. Это объясняется длительностью воздействий, которая соответственно составляет 4мс и 400 мкс. Микроструктура покрытий представляет собой оплавленный металлокерамический материал. При оплавлении активизируется химическое взаимодействие на границах основных фаз нанесенных композиций. Продуктами химического взаимодействия могут быть тонкодисперсные (в том числе наноразмерные) образования, которые упрочняют границы основных фаз и покрытие в целом.

3. Оптимальные дистанции импульсно-плазменной обработки покрытий для Al₂O₃-TiO₂-MoS₂-Mo - 0,07м. Об этом свидетельствует стабилизация пористости, желаемого уменьшения которой по критерию оптимизации при дистанциях ниже 0,07м м практически не происходит, что, объясняется кратковременностью тепловых и динамических импульсных воздействий (~ 200 мкс), а также значительным содержанием в покрытиях тугоплавкой фазы, препятствующей возрастанию степени оплавления и уплотнения покрытий. Кроме того, при дистанциях ≤ 0,05 м наблюдается разрушение покрытий с развитием макротрещин. Наряду с дистанцией обработки для формирования полностью оплавленных по всей толщине покрытий оптимизировали суммарное количество импульсов плазмы. Установлено, что необходимое и достаточное количество импульсов для полной обработки покрытий составляет 11-12. Дополнительные

импульсы нецелесообразны, так как их многократное повторение ухудшает геометрию поверхности покрытия. Слои покрытий представляют собой оплавленный металл - керамический материал. Имеет место достаточно равномерное распределение структурных элементов. Это способствует увеличению износостойкости нанесенных композиций.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пантелеенко, Ф. И. Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов / Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый. – Минск: БНТУ, 2019. – 251 с.
2. Пантелеенко, Ф. И. Разработка композиционного материала на основе многофункциональной керамики для плазменного напыления / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, В. М. Асташинский, В. В. Оковитый. // Упрочняющие технологии и покрытия. – Москва: Машиностроение, 2015. – Вып.2. – С. 43-47.
3. Оковитый, В. А. Оптимизация процесса напыления износостойких покрытий на основе многофункциональной оксидной керамики / В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Обработка металлов. – Новосибирск, 2015. – №2(67). – С. 46-54.
4. Оковитый, В. А. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики / В. А. Оковитый, Ф.И. Пантелеенко, Т. Л. Талако, А. Ф. Пантелеенко // Обработка металлов. – Новосибирск, 2015. – №2(67). – С. 39-45.
5. Пантелеенко, Ф. И. Исследование процессов и оптимизация технологических параметров импульсно-плазменной обработки плазменных покрытий из материалов на основе многофункциональной оксидной керамики / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, В. М. Асташинский, В. В. Оковитый // Труды международной научно-технической конференции «Инновации в машиностроении». – Кемерово, 2015. – С. 360-364.
6. Пантелеенко, Ф. И. Анализ и выбор возможных вариантов напыления композиционных многослойных покрытий из порошков оксидной керамики на модели элементов экранов противометеорной защиты / Ф. И. Пантелеенко, В. В. Оковитый, В. А. Асташинский // Тезисы международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера 21 века», 12-17 сентября 2017 г., г. Севастополь. – Т.1, – С. 185-190.
7. Оковитый, В. А. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Асташинский, В.В. Оковитый // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып.3. – С. 183-189.
8. Оковитый, В. А. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, В. В. Оковитый, В. М. Асташинский, В.В. Углов. // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып. 5. – С. 377-389.
9. Пат. 031920 Евразийский, Способ нанесения газотермического покрытия / Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. – № 2017/ЕА/0018; заявл. 05.04.17.

Поступила в редколлегию 23.01.2020 г.

УДК 621.793, 691.9.048.4

Н. М. Чигринова, д-р техн. наук, профессор
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь
Тел./Факс: +375 17 293 95 81; E-mail: chygrynova@ya.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

В работе предложена математическая модель энергомеханической интенсификации метода электроискрового легирования за счет применения дополнительного ультразвукового воздействия с разработкой и определением взаимосвязи составных частей системного анализа, включающих моделирование на уровне математических аналогий, структуризацию, иерархию и исследование законов протекания взаимодействий в системе металл – среда – покрытие, связь системы с условиями эксплуатации. Приведены физические модели плазменных явлений при электроискровом легировании как основа для разработки теории интегральной технологии с участием ультразвука.

Ключевые слова: интегральная технология электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием, анодно-катодные взаимодействия, электроразряд, вибрация анода, эрозия электрода, затвердевание капли.

N. M. Chigrinova

MODELING THE PROCESS OF ENERGY-MECHANICAL INTENSIFICATION OF MICROPLASMA PROCESSING IN A GAS ENVIRONMENT

The paper proposes a mathematical model of the energy mechanical intensification of the electric spark doping method by applying additional ultrasonic influence with the development and determination of the relationship of the components of the system analysis, including modeling at the level of mathematical analogies, structuring, hierarchy, and study of the laws of interaction in the metal-medium-coating system, the relationship of the system with operating conditions. Physical models of plasma phenomena in electric spark doping are presented as a basis for developing the theory of integral technology involving ultrasound.

Keywords: Integrated technology of electric spark doping with additional ultrasonic influence, anode-cathode interactions, electric discharge, anode vibration, electrode erosion, drop solidification.

Введение.

Совершенствование упроченных, восстановленных или модифицированных в процессе стандартного электроискрового легирования (ЭИЛ) изделий, а также созданных на их поверхностях покрытий связано с оптимизацией их структурного состояния. Электроискровое легирование, представляя собой разновидность искровых микроплазменных процессов обработки металлических материалов, осуществляется в условиях регулируемого электрического разряда в воздушной среде и, благодаря электротермическому действию импульсного электрического тока, обеспечивает перенос материала анода (электрод) на катод (деталь) в процессе изменения положения электродов относительно друг друга [1–3].

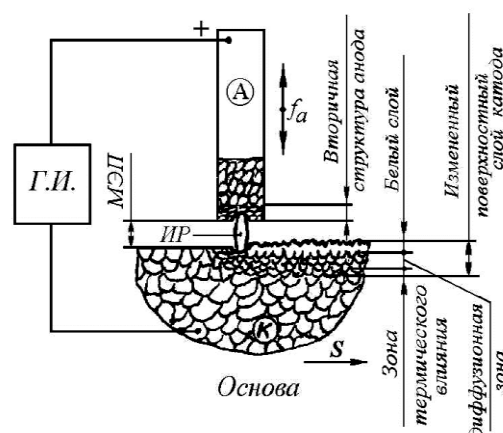
При сближении электродов напряженность электрического поля увеличивается и, достигнув определенной величины, вызывает воздушный пробой промежутка между электродами. Возникает канал сквозной проводимости, формирующий микродуговой газовый разряд. Появляющийся при этом ток пробоя по своей природе является импульсным током. Он вызывает локальный разогрев и плавление материала анода, приводит к локальному разогреву ионов воздуха, их стремительному расширению (взры-

ву), увеличению зоны пробоя, отрыву и осаждению на поверхность катода материала анода. После этого разряд прекращается.

Объем плазмы, образуемой при электрическом разряде в момент возникновения искры между анодом и катодом, увеличивается в течение времени t , длительность которого обычно составляет менее 100 мкс. В результате расплавления материала анода окружающий эродирующий материал плотный «жидкий» диэлектрик сдерживает рост плазмы, фокусируя энергию UIt , в малой области. При этом локальные плазменные температуры могут достигать $\sim 40\,000$ К. Здесь t – длительность электроискрового разряда. Первым быстро расплавляется анод вследствие поглощения высокоэнергетичных электронов в начале процесса образования плазмы [2, 3].

Получение однородной структуры обработанной поверхности или покрытия со сниженным уровнем и выравненным градиентом напряжений, высокими равнотолщиной и плотностью, малой шероховатостью достигается за счет повышения интенсивности энергии механического воздействия в результате применения ультразвука. Активное действие ультразвука на вещество и на физические процессы в нем приводит к необратимым изменениям, обусловленным в большинстве случаев нелинейными эффектами в звуковом поле. Ультразвуковая обработка поверхности покрытия, созданного в результате ЭИЛ, приводит к созданию наноструктурированного приповерхностного слоя, обладающего уникальными механическими свойствами.

В общем случае система для осуществления процесса ЭИЛ состоит из катода, анода и разделяющего их газообразного диэлектрика (рис.1).



Г.И. – генератор импульсов, МЭП – межэлектродный промежуток, ИР – искровой разряд, А – анод (компактный электрод), К – катод (деталь), f_a – частота вибрации анода, S – направление подачи детали

Рисунок 1. Общая схема процесса ЭИЛ [2]

Затем, спустя несколько микросекунд, анод начинает затвердевать. Это объясняется расширением радиуса плазмы около анода, что приводит к уменьшению локального теплового потока на поверхности анода. Расплавление катода запаздывает по времени по сравнению со временем расплавления анода вследствие низкой мобильности положительных ионов вблизи анода. Более того, поскольку катод эмитирует электроны, радиус плазмы на катоде также гораздо меньше, что

обеспечивает применимость модели точечного теплового источника в этом промежутке между анодом и катодом.

Последующие рассуждения и расчеты будут применяться к модернизированному методу, в процессе которого применяется серийное электроискровое оборудование типа «Элитрон», и дополнительного ультразвукового воздействия, осуществляемого с помощью серийных установок УИЛ-2. При этом принимается, что анодно-катодное взаимодействие, т.е. контакт легирующего электрода (анода) и обрабатываемого объекта (катада) может быть представлено как работа матрицы и пуансона в пресс-форме. Продолжительность ультразвукового воздействия с частотой $f = 20 - 40$ кГц не превышает 25-50 мкс. При указанных длительностях импульса скорость эрозии достаточно мала, что обусловлено длительным временем остывания и затвердевания материала на катоде. При интегральной ЭИЛ с УЗВ обработке электрод (анод) не обязательно должен физически контактировать с обрабатываемой поверхностью катада, т.е. в принципе, анод не может оказывать силовое воздействие на поверхность катада (за исключением воздействия, обусловленного давлением плазмы).

После завершения процесса переноса материала анода на катод в плазменном канале и остывания перенесенного объема, наступает пауза δ между двумя последовательными электроискровыми разрядами. В течение этого периода происходит коллапс плазменного канала и пузыря с паром, что приводит к взрыву в диэлектрике перегретого, расплавленного металла на поверхности обоих электродов. Часть переносимого материала испаряется и мелкими каплями расплескивается в воздух, а другая затвердевает в полости, образовавшейся на поверхности катада. Эти полости “заглаживаются” в процессе механических с ультразвуковой частотой биений подвижного электрода (анода) по поверхности катада, что приводит к формированию сверхгладких, наноструктурированных приповерхностных областей [3].

1. Основная часть.

Известно [3], что образование и прирост толщины покрытия при электроискровом легировании обусловлены эрозией легирующего электрода. При этом определяющими параметрами эрозионного процесса являются прежде всего длительность обработки t и длительность паузы между последовательными искровыми разрядами δ , определяющих объем переносимого материала. Поэтому для определения скорости эрозионного переноса материала анода на катод были выбраны указанные временные характеристики, а решение задачи оптимизации параметров эрозионного процесса базируется на следующих физических законах:

- 1) на основе модели теплопроводности от точечного источника при искровом разряде рассчитан объем эродировавшего материала анода;
- 2) на основе модели теплопроводности от мгновенного сферического источника тепла рассчитано время остывания расплавленной капли материала эродирующего анода в результате искрового разряда;
- 3) на основе экспериментальных данных по зависимости потери массы анода от времени проведения процесса ЭИЛ решена оптимизационная задача расчета минимальной длительности паузы между двумя последовательными искровыми разрядами при прохождении стадий интегрального метода ЭИЛ с УЗВ;
- 4) с использованием оптимизационной методологии оценено влияние вольт-амперных характеристик установки «Элитрон», а также времени процесса УЗВ на скорость эрозии анода в процессе искрового разряда.

Скорость эрозии электрода обусловлена объемом проэродировавшего материала анода в единицу суммарной длительности импульса и паузы между двумя последовательными разрядами.

Для разработки модели эрозии электрода при ЭИЛ сделаны следующие допущения:

1) только один искровой разряд приходится на каждый импульс напряжения, и радиус плазмы в процессе разряда остается достаточно малым (менее 5 мкм), что позволяет использовать модель точечного теплового источника;

2) эффективные (средние) физические свойства материалов электродов применимы ко всему диапазону температур (от твердого состояния до жидкого в расплавленном состоянии);

3) при расчете полного объема эрозии и длительности импульса не учитывается наличие начальной полости, обусловленной асимптотическим температурным профилем в анодно-катодной зоне;

4) постоянная доля F_c мощности от полной, выделяемой при электрическом разряде, теряется на аноде независимо от величины тока и длительности импульса. F_c может изменяться при использовании электродов иного химического состава.

Уравнение теплопроводности без источников, описывающее процесс электрического разряда, имеет в цилиндрической системе координат следующий вид [4]:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{k_T}{\rho C_p}$ – коэффициент термодиффузии.

где k_T – теплопроводность материала анода, ρ – его плотность и C_p – его теплоемкость при постоянном давлении.

Начальные условия для решения уравнения (1) можно представить в следующем виде:

$$t = 0, \quad \forall r, \quad T = T_0 \quad (2)$$

а граничные условия:

$$-k_T \frac{\partial T}{\partial r} = q_0, \quad \text{для } r = 0, \quad (3)$$

$$-k_T \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \text{для } r = \infty,$$

$$\text{и } T = T_0 \text{ при } t > 0 \text{ и } r = \infty, \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды, q_0 – мощность тепловыделения.

Резльтирующее распределение температуры с учетом граничных и начальных условий:

$$T = T_0 + \left(\frac{F_c UI}{2\pi k_T r} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{r}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (5)$$

Если обозначить радиус расплавленной зоны как R , когда $T=T_m$, то выражение (5) примет вид:

$$T(R) = T_m = T_0 + \left(\frac{F_c UI}{2\pi k_T R} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (6)$$

где T_m – температура плавления материала анода; t – время процесса эрозии.

Соотношение (6) позволяет выразить зависимость радиуса капли расплавленного в процессе электроискрового разряда материала анода $R(t)$ от длительности электроискрового разряда t .

Предположим, что начальная температура капли размером $0 \leq r \leq R$ составляет 10000 К, и на ее поверхности происходит конвективный теплообмен с окружающей средой, имеющей температуру T_0 . Для определения момента времени, начиная с которого в центре капли будет иметь место регулярный режим, т.е. в ней установится температура T_0 , используем уравнение распространения тепла в сферических координатах [5–7]:

$$\partial_t T(t, r) - a^2 \left(\partial_{r,r} T(t, r) + \frac{2}{r} \partial_r T(t, r) \right), \quad (7)$$

если отсутствуют внешние источники тепла.

Параметр $\alpha = k_T / \rho C_p$ в (7), как и в уравнении (1) – коэффициент термодиффузии.

Теплообмен на границе капли описывается уравнением Ньютона:

$$\partial_r T(t, R) = \frac{h}{k_T} (u_1 - T(t, R)), \quad (8)$$

где h – коэффициент теплообмена анода.

Уравнения (7) и (8) совместно с начальным условием $T(0, r) = u_0 = 10000$ смешанная задача. Радиус капли R определяется путем минимизации целевой функции по фактическим данным.

Смешанная задача решается методом разделения переменных [3,4] и ее решение имеет вид:

$$T(r, t) = T_0 + 2(u_1 - u_0) h R^2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR - 1)^2}}{\xi_n (\xi_n^2 + h^2 R^2 - hR)} \exp \left(- \frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2} \right) \frac{\sin \left(\frac{\xi_n r}{R} \right)}{r}, \quad (9)$$

где ξ_n – положительные корни трансцендентного уравнения

$$\operatorname{tg}(\mu) = - \frac{\mu}{Rh - 1}. \quad (10)$$

Проанализируем влияние величины коэффициента теплообмена на результат решения уравнения (8).

На рис. 2 приведены зависимости, являющиеся решением трансцендентного уравнения (9) при $h=0.1$. Ординаты точек пересечения кривых являются корнями уравнения (9).

Анализ результатов численного решения трансцендентного уравнения (9) показал слабую зависимость корней этого уравнения от величины параметра h : так, увеличение значения этого параметра на 4 порядка от 10^{-1} до 10^3 привело к значениям его первых двух положительных корней соответственно от (4.49341, 7.72525) до (4.49544, 7.72643). Заметное изменение корней этого уравнения происходит только при значении $h=10^6$: (2.80883, 5.67371).

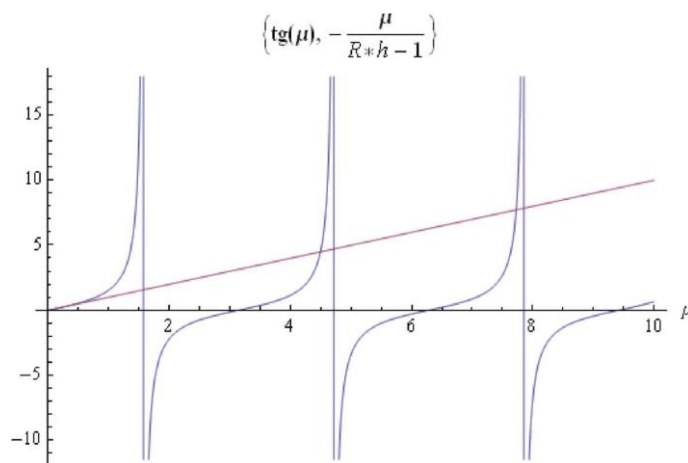


Рисунок 2. Решение трансцендентного уравнения (9) при значении параметра $h=0.1$

Решение уравнения (9) при $h=10^6$ иллюстрируется рис. 3.

Зависимость температуры в центре капли от времени выражается следующим образом:

$$T(0,t) = u_1 + 2(u_1 - u_0)hR \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sqrt{\xi_n^2 + (hR-1)^2}}{(\xi_n^2 + h^2R^2 - hR)} \text{Exp}\left(-\frac{a^2 \xi_n^2 t}{R^2}\right) \quad (11)$$

Если $hR < 1$ (что соответствует случаю $h < 6.14662 \times 10^6$), то при всех значениях времени удовлетворяющих неравенству

$$t \geq t_*^{def} = -\frac{R^2}{a^2(\xi_1^2 - \xi_2^2)} \ln \left(\frac{\xi_2^2 + h^2R^2 - hR}{\xi_1^2 + h^2R^2 - hR} \sqrt{\frac{\xi_1^2 + (hR-1)^2}{\xi_2^2 + (hR-1)^2}} \right) \quad (12)$$

в центре капли заведомо будет иметь место регулярный режим.

В таблице 1 приведены значения длительности остывания капли t , вычисленные из выражения (11), в зависимости от величины константы h .

Таблица 1. – Длительность остывания капли t , вычисленные из выражения (12), в зависимости от значения константы h

h	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$1 \cdot 10^{-1}$
t	$3.109158 \cdot 10^{-8}$	$9.093769 \cdot 10^{-8}$	$9.098667 \cdot 10^{-8}$	$9.098671 \cdot 10^{-8}$

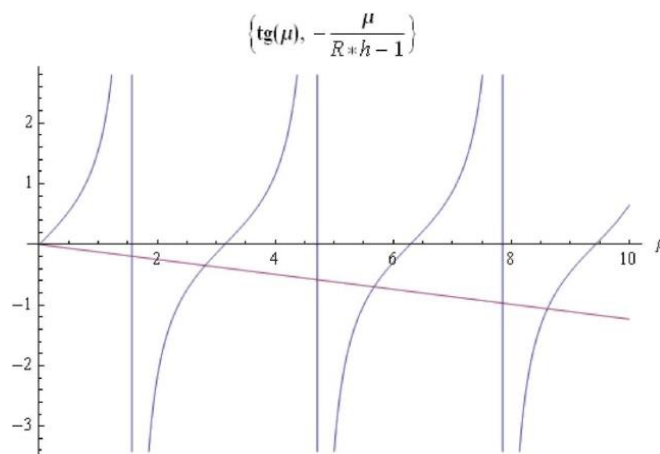


Рисунок 3. Решение трансцендентного уравнения (9) при значении параметра $h=10^6$

3. Заключение.

Таким образом, выполненные исследования позволили заключить и реализовать следующее:

1) Одной из основ моделирования изучаемых процессов является их термомеханика, обобщаемая в виду сложности описываемых процессов критериальными или линеаризованными уравнениями. Для решения указанных задач разработано несколько физико-математических моделей:

- физико-математическая модель расчета объема материала анода, эродированного в одном искровом разряде в процессе ЭИЛ, на основе модели теплопроводности от точечного источника (что справедливо для искрового разряда);

- физико-математическая модель расчета времени остывания капли расплавленного материала анода, представляющей собой расплавленный объем эродированного в результате искрового разряда материала анода, с использованием модели теплопроводности от мгновенного сферического источника тепла;

- полученные экспериментальные данные по зависимости потери массы анода от продолжительности легирования позволили решить задачу оптимизации параметров и режимов ЭИЛ с применением модели малых колебаний системы, в основе которой лежит предположение о том, что в зависимости от очередности воздействия и характера и мощности затраченной механической энергии в процессе легирования катода интегрально меняется его исходная структура. В терминологии теории малых колебаний систем с конечным числом степеней свободы совокупность таких состояний можно интерпретировать в форме коэффициентов влияния в дифференциальном уравнении, описывающем свободные колебания механических систем.

2) С помощью оптимизационной методологии оценено влияние вольт-амперных характеристик установок «Элитрон» и «УИЛ», а также времени процесса легирования на скорость эрозии анода в процессе искрового разряда.

- Посредством анализа численного решения задач теплопроводности с мощным точечным тепловым источником тепловыделения и остывания без источников, показано, что время остывания капли эродированного анода заметно меньше других временных параметров, характеризующих процесс легирования.

- Проведены сравнительные оценки временных параметров – длительностей электроискрового разряда и паузы между двумя последовательными разрядами.

• Определен период ультразвуковых вибраций анода с целью оптимизации совместного воздействия электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием.

• Анализ результатов решения уравнения теплопроводности, описывающего процесс остывания капли расплавленного в результате электроискрового разряда материала анода, показал:

– входящие в уравнение теплопроводности корни ξ трансцендентного выражения слабо зависят от материального параметра – коэффициента теплообмена h между каплей эродирующего материала и средой;

– время остывания капли t материала анода, осевшей на поверхность катода, чрезвычайно мало и составляет десятые доли микросекунды, что на порядки величин меньше других временных параметров, характеризующих процесс УЗВ: период между двумя последовательными электроискровыми разрядами (~50 мкс), длительность электроискрового разряда (~100 мкс), период продольных биений анода, колеблющегося с ультразвуковой частотой (25–50 мкс), что следует учитывать при выработке рекомендаций для выбора технологических параметров проведения процесса УЗВ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко, Б. Р. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 12-16.

2. Верхотуров, А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А. Д. Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323 с.

3. Сафронов, И. И. Электроэрозионные процессы на электродах и микроструктурно-фазовый состав легированного слоя / И. И. Сафронов [и др.]. – Кишинев, 1999. – 591 с.

4. DiBitonto, D. Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. I. A Simple Cathode Erosion Model // D. DiBitonto [et al.] // J. Appl, Phys. – 1989. – Vol. 66. – P. 4095–4103.

5. Revaz, B. Local temperature response to pulsed discharges in electronic discharge machining (EDM) environment / B. Revaz [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33, Issue 3. – P. 1066–1071.

6. A. Yahya and C. D. Manning Modelling, simulation and controller design for Electro Discharge Machine System // Electronic Systems and Control Division Research, 2003, P.21-23.

7. Eubank, P.T. Theoretical Models of the Electrical Discharge Machining Process. III. The Variable Mass, Cylindrical Plasma Models / P.T. Eubank, M.R. Patel, M.A. Barruffet // J. Appl, Phys. – 1993. – Vol. 73. – P. 7900–7905.

Поступила в редколлегию 18.01.2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Азарова Н.В., Цокур В.П. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ АЛМАЗНОГО КРУГА В ПРОЦЕССЕ ШЛИФОВАНИЯ.....	3
Арефьев Е.М., Гутаревич В.О., Забродченко П.О. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЗАГРУЖЕННОСТИ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ВИБРОЧИСТКИ ЛЕНТЫ	10
Бутенко В.И., Садовая И.В. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИКРОЧАСТИЦ В МОДИФИЦИРОВАННОМ МАТЕРИАЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ	18
Витренко В.А., Сыровой Г.В., Афошин А.А. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ В 3-D ПЕЧАТИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПО FDM-ТЕХНОЛОГИИ	25
Гусев В. В., Афендииков В. А. ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВОРОТНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ ГОЛОВКИ	30
Ивченко Т. Г. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРИОДА СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ ОПТИМИЗАЦИИ	37
Комаров А.И., Белоцерковский М.А., Сосновский И.А., Орда Д.В., Курилёнок А.А. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ СИЛУМИНА АК12, НАНЕСЕННЫХ НА СТАЛЬНУЮ ОСНОВУ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ИНДУКЦИОННЫМ МЕТОДОМ	43
Костенко А. В., Михайлов А.Н. ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО РЕСУРСА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ.....	52
Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ МОДИФИКАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПЛАЗМЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЕРАМИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОБАВОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ	61
Чигринова Н. М. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ МИКРОПЛАЗМОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ.....	67

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Азарова Н.В.	3
Арефьев Е.М.	10
Асташинский В.М.	61
Афендиков В. А.	30
Афошин А.А.	25
Белоцерковский М.А.	43
Бутенко В.И.	18
Витренко В.А.	25
Гусев В. В.	30
Гутаревич В. О.	10
Девойно О.Г.	61
Забродченко П.О.	10
Ивченко Т. Г	37
Комаров А.И.	43
Костенко А.В.	52
Курилёнок А.А.	43
Михайлов А.Н.	52
Оковитый В.А.	61
Оковитый В.В.	61
Орда Д.В.	43
Пантелеенко Ф.И.	61
Садовая И.В.	18
Сидоров В.А.	61
Сосновский И.А.	43
Сыровой Г.В.	25
Цокур В.П.	3
Чигринова Н. М.	67

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

Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения» издается с 1994 года. В этом сборнике публикуются ученые и специалисты более чем из 30 стран мира.

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

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

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

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

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

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

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

Языки представления рукописей: **русский, украинский и английский.**

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА

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

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

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

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

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

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

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

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

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

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

СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ

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

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

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

- формулирование цели и постановка задач работы;

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

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

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

8. Материалы статьи представляются в электронном виде.

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

СТАТЬИ ДОЛЖНЫ ИМЕТЬ СЛЕДУЮЩУЮ СТРУКТУРУ:

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

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

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

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

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

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

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

7. Введение (Introduction). (12 pt)

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

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

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

9. Авторский знак. Внизу первой страницы статьи необходимо указать авторский знак - ©. Например: © Иванов И.И., Петренко П.П.; 2017 (10 pt).

10. Заключение (Conclusion) (12 pt)

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

11. Литература (References). (12 pt)

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

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

Тел./факс: +38 062 305-01-04.

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

<http://ptsm.donntu.ru>

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

Образец оформления материалов
УДК 621.85.05-034(12 pt)

И. И. Иванов, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)
Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)
Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.org (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

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

(пустая строка - 12 pt)

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

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

(пустая строка - 10 pt)

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

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

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

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

(пустая строка - 12 pt)

1. Введение (12 pt)

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

(пустая строка - 12 pt)

2. Основное содержание и результаты работы (12 pt)

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

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

где k_m - элемент множества;

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

(пустая строка - 12 pt)

3. Общий алгоритм и рекомендации (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм

..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

4. Цифровые модели (12 pt)

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

(пустая строка - 12 pt)

5. Заключение (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов

..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности

..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации

© Иванов И.И., Петренко П.П.; 2016 (приводится внизу первой страницы статьи, 10 pt)

..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

ЛИТЕРАТУРА:

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

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

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

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

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

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

6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин // Научно-технический журнал. – 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 1 (68)' 2020

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

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

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

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

E-mail: tm@fimm.donntu.org

Сайт: <http://ptsm.donntu.org>

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