

Вып. 4 (87)' 2024 **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 4 (87)' 2024



ДОНЕЦК - 2024

ISSN 2073-3216
(E) ISSN 2518-7120

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Международный сборник научных трудов

Основан в декабре 1994 года

Выходит 4 раза в год

Выпуск 4 (87)' 2024

Донецк – 2024

УДК 621.01(06)

Рекомендован к изданию Ученым Советом Донецкого национального технического университета (протокол № 1 от 20 февраля 2024 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 – ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (Свидетельство о государственной регистрации юридического лица от 07.04.2016 г. № 029192 серия АА03).

Издается при содействии **Донецкого регионального отделения «Союз машиностроителей России»**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Михайлов А.Н. (гл. редактор) (ДНР), Горобец И.А. (зам. гл. редактора) (ДНР), Лахин А.М. (секретарь) (ДНР), Баласанян Б.С. (Армения), Бахадиров Г.А. (Узбекистан), Брешев В.Е. (ЛНР), Бутенко В.И. (РФ), Витренко В.А. (ЛНР), Мазуру С. (Молдова), Овчинников Е.В. (Беларусь), Пантеленко Ф.И. (Беларусь), Поветкин В.В. (Казахстан), Суслов А.Г. (РФ), Тока А. (Молдова), Хандожко А.В. (РФ)

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

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

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

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

ISSN 2073-3216
ISSN 2518-7120 (E)

© Авторы статей, 2024
© ФГБОУ ВО «ДОННТУ», 2024

УДК 621.85.05-034

В. Ю. Блюменштейн, д-р техн. наук, проф., **Д. А. Нерсисян**, аспирант
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г.
Кемерово, Россия
Тел.: +7 996 4129942; E-mail: dave62171@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PYTHON ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В статье рассматривается использование программного обеспечения Python для обработки данных из ANSYS и прогнозирования релаксации остаточных напряжений в цилиндрических деталях. Представлены методы анализа данных и их применения для упрощения расчетов и моделирования.

Ключевые слова: Python, ANSYS, релаксация остаточных напряжений, цилиндрические детали, моделирование.

V. Yu. Blumenstein, D. A. Nersisyan

USING PYTHON TO ANALYZE RESIDUAL STRESS RELAXATION IN CYLINDRICAL PARTS AFTER SURFACE PLASTIC DEFORMATION

This article discusses the use of Python software to process data from ANSYS and predict residual stress relaxation in cylindrical parts. Methods for data analysis and their application to simplify calculations and modeling are presented.

Keywords: Python, ANSYS, residual stress relaxation, cylindrical parts, modeling.

1. Введение

Проблема релаксации остаточных напряжений в цилиндрических деталях после поверхностного пластического деформирования является актуальной задачей современного машиностроения. Известно, что остаточные напряжения могут существенно влиять на долговечность и надежность деталей. Современные исследования направлены на разработку методов их прогнозирования и управления. В частности, методы моделирования в ANSYS [1,2] позволяют получать точные данные о напряжениях, однако обработка и анализ этих данных требуют значительных временных и вычислительных ресурсов.

2. Основное содержание и результаты работы

Для оптимизации обработки данных, полученных из ANSYS, был предложен метод использования Python. Данный подход позволяет автоматизировать процесс анализа и прогнозирования релаксации остаточных напряжений. Программа считывает данные из Excel-файла, содержащего результаты моделирования, и строит графики напряжений во времени.

Известно, что расчёт релаксации остаточных напряжений цилиндрических деталей после поверхностного пластического деформирования задача трудоемкая [3], в связи с этим предлагается метод оптимизации данного процесса. Рассмотрим на примере расчёта вала, который был подвержен циклическому нагружению (рис.1).

Материал образца – сталь 45, ГОСТ 1050–2013. Известно, что предел текучести образца $\sigma_T = 360$ МПа, а предел прочности $\sigma_B = 600$ МПа. Твердость образца составляет 160...180 HV. Образец вращается вокруг своей оси с частотой $n = 3000$ об/мин. Амплитуда напряжений цикла составляет $\sigma_a = 280$ Мпа.



Рисунок 1. Схема нагружения испытываемого вала

После расчета остаточных напряжений в ANSYS программа выдает значения в табличном формате. Таблица в общем виде представлена на рисунок 2.

Tabular Data				
	Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]	Average [Pa]
1	0,2	1,8398e+005	1,1937e+008	4,1328e+007
2	0,4	3,6797e+005	2,3874e+008	8,2656e+007
3	0,7	74822	3,1626e+008	1,4265e+008
4	1,	7,0574e+005	3,5503e+008	2,0011e+008
5	1,2	5,2293e+005	2,6583e+008	1,5946e+008
6	1,4	3,4147e+005	2,1078e+008	1,1887e+008
7	1,7	91403	1,3833e+008	5,9196e+007
8	2,	1772,4	2,0303e+008	2,5999e+007
9	2,2	2,8357e+005	2,3701e+008	3,1104e+007
10	2,4	2,6937e+005	2,7111e+008	3,8921e+007
11	2,7	4,2386e+005	3,2239e+008	5,319e+007
12	3,	4,226e+005	3,5505e+008	6,937e+007
13	3,2	3,9505e+005	2,8742e+008	4,8125e+007
14	3,4	2,83e+005	2,1995e+008	3,1022e+007
15	3,7	1,2404e+005	1,1994e+008	3,333e+007
16	4,	98836	1,41e+008	6,1139e+007
17	4,2	83404	1,1098e+008	4,061e+007
18	4,4	89755	1,5298e+008	2,8331e+007
19	4,7	2,6904e+005	2,5365e+008	3,8845e+007
20	5,	4,226e+005	3,5502e+008	6,937e+007

Рисунок 2. Расчетные значения остаточных напряжений после моделирования

Однако, с полученными данными тяжело работать по ряду причин. Основная причина – большое количество времени для расчета релаксации остаточных напряжений. ANSYS предлагает методы расчёта релаксации остаточных напряжений, но максимально возможный расчёт в данном случае возможен лишь для 200 циклов нагружения. В связи с этим, предлагается оптимизация, путём написания программы в python для работы с расчётными данными.

Предлагается написание программы с использованием полиномиальной аппроксимации [4], которая используется для построения модели, описывающей зависимость остаточных напряжений от времени. В данном случае предлагается использование полинома пятой степени, который описывается следующей формулой:

$$\sigma(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ – остаточные напряжения в момент времени t ; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – коэффициенты полинома, определяемые методом наименьших квадратов.

Аппроксимация позволяет сгладить данные [4] и выявить общую тенденцию изменения остаточных напряжений во времени, что помогает прогнозировать их поведение в будущем.

Применение полиномиальной аппроксимации [5] обосновано следующими причинами:

1. Гибкость модели: Полиномы высокой степени могут точно описывать сложные нелинейные зависимости, что особенно важно при анализе релаксации остаточных напряжений, характеризующихся значительными колебаниями.
2. Простота вычислений: Метод наименьших квадратов для определения коэффициентов полинома является относительно простым и эффективным с вычислительной точки зрения, что позволяет быстро обрабатывать большие объемы данных.
3. Интерпретируемость: Полиномиальные модели легко интерпретируются и визуализируются, что делает их удобными для анализа и представления результатов.
4. Адаптивность: Полиномы могут адаптироваться к различным типам данных, включая те, которые имеют тенденцию к релаксации во времени, что делает их универсальным инструментом для прогнозирования.

3. Общий алгоритм и рекомендации

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм написания программы в python, который выглядит следующим образом:

1. Загрузка данных из Excel-файла;
2. Проверка и вывод первых строк для отладки;
3. Извлечение данных;
4. Полиномиальная аппроксимация;
5. Прогнозирование;
6. Визуализация;
7. Сохранение параметров модели;

4. Цифровые модели

Учитывая выше сказанное, была разработана программа в python для оптимизации расчётных данных из ANSYS (рисунок 3).

```
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from numpy.polynomial.polynomial import Polynomial

# Загрузка данных из Excel-файла
file_path = r'C:\Users\User\Desktop\Использование Python для анализа и прогнозирования релаксации остаточных напряжений
data = pd.read_excel(file_path)

# Проверка и вывод первых строк для отладки
print(data.head())
print(data.columns)

# Извлечение данных
time = data['Time'].values
stress = data['Stress'].values

# Полиномиальная аппроксимация
polynomial_degree = 5 # степень полинома
coefs = np.polyfit(time, stress, polynomial_degree)
poly = np.polyid(coefs)

# Прогнозирование
predicted_stress = poly(time)

# Визуализация
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(time, stress, 'b-', label='Исходные данные')
plt.plot(time, predicted_stress, 'r--', label='Прогноз')
plt.xlabel('Время')
plt.ylabel('Остаточные напряжения')
plt.legend()
plt.title('Прогнозирование релаксации остаточных напряжений (полиномиальная аппроксимация)')
plt.show()
```

Рисунок 3. Общий вид программы в python для оптимизации расчётных данных

Запустив программу, удалось получить график, представленный на рисунок 4.

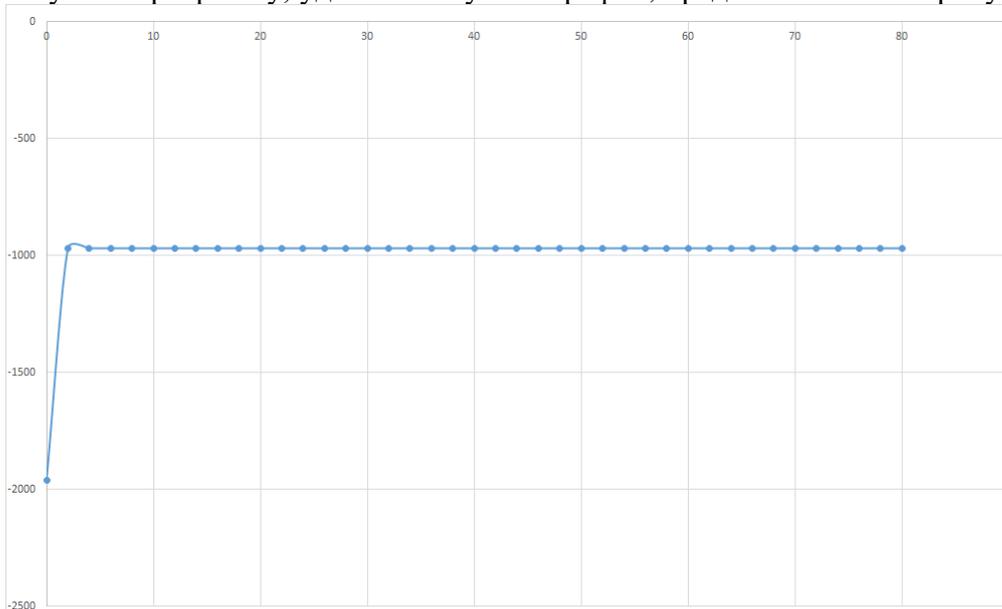


Рисунок 4. График зависимости остаточных напряжений от времени

Анализ данных показал, что использование Python значительно упрощает процесс обработки и визуализации данных. Это подтверждается графиками, на которых исходные данные и результаты аппроксимации находятся в хорошем согласии.

Известно, что точность прогноза зависит от качества исходных данных и выбранной модели. В данном исследовании доказано, что полиномиальная

аппроксимация может эффективно использоваться для прогнозирования релаксации остаточных напряжений.

5. Заключение

Выводы исследования показывают, что использование Python для анализа данных из ANSYS позволяет существенно сократить время и ресурсы, необходимые для обработки данных. Применение полиномиальной аппроксимации пятой степени обеспечивает точное прогнозирование релаксации остаточных напряжений в цилиндрических деталях. Дальнейшие исследования могут быть направлены на применение более сложных моделей и методов машинного обучения для повышения точности прогнозов.

Настоящее исследование является частью текущей работы, направленной на дальнейшее изучение релаксации остаточных напряжений. В исследовании стремимся разработать и усовершенствовать модели, которые смогут более точно описывать эти процессы, включая различные методы их стимулирования и контроля. Это исследование поддерживается активным сбором данных, анализом и экспериментами, которые проводятся с использованием последних достижений в области моделирования релаксации остаточных напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блюменштейн, В. Ю. Методика проведения расчетов характеристик усталостного нагружения в ANSYS FATIGUE TOOL / В. Ю. Блюменштейн, Д. А. Нерсиян // Инновации в машиностроении : материалы докладов XIII Международной научно-практической конференции ИнМаш-2022, Барнаул, 23–25 ноября 2022 года / Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2022. – С. 252-256.
2. Нерсиян, Д. А. Решение задач усталости в условиях циклического нагружения в ANSYS Fatigue Tool / Д. А. Нерсиян // Россия молодая : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XIV ВСЕРОССИЙСКОЙ, НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 42310.1-42310.6.
3. Моделирование остаточных напряжений на разных этапах жизненного цикла изделий/ В. Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов – Вестник машиностроения, 2014. – 11с.
4. Клячин, А. А. Оценка погрешности вычисления площади при кусочно-полиномиальной аппроксимации / А. А. Клячин, А. Г. Панченко // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 22-30. – DOI 10.15688/mpcm.jvolsu.2020.2.2. – EDN XYUGML.
5. Нейдорф, Р. А. Структурно-параметрическая оптимизация трёхмерной полиномиальной аппроксимации экспериментальных данных / Р. А. Нейдорф, В. В. Полях // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. – 2019. – Т. 10. – С. 29-33. – EDN PEABSI.

Поступила в редколлегию 08.02.2024

В. Ф. Борисенко, канд. техн. наук, доц., **В. А. Сидоров**, д-р. техн. наук, доц.
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Россия.
Тел./Факс: +7 949-354-89-96; E-mail: borissenko.vp@gmail.com

ОБОБЩЁННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТИПОВОЙ МНОГОСВЯЗНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Современный уровень развития аппаратных, цифровых, информационных, средств связи и измерений позволяет решать многие вопросы диагностирования технического состояния диагностирования ЭМС и выработки на их базе прогнозов долгосрочного (кратковременного) функционирования, а также сроков проведения ремонтных операций, их уровня и требуемого для этого уровня ремонтного оборудования.

На практике, в реальных условиях промышленного предприятия, задача технической оценки работоспособности конкретного объекта ставится в другой плоскости, исходя из оснащённости, например, завода средствами диагностирования, наличием высококвалифицированных специалистов, способных выполнить оценку состояния объекта и дать точные и жёсткие целеуказания на характер дальнейшего использования оборудования и режимов его работы, исходя из длительности эксплуатации оборудования, его ремонтпригодности, а также наличия резервного оборудования и степени его доступности.

Ключевые слова: техническое состояние, электромеханическая система, диагностирование.

V. F. Borisenko, V. A. Sidorov

A GENERALIZED APPROACH TO ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION A TYPICAL MULTICOMMUNICATED ELECTROMECHANICAL SYSTEM (EMC)

The current level of development of hardware, digital, information, communication and measurement tools allows us to solve many issues of diagnosing the technical condition of EMC diagnostics and developing forecasts of long-term (short-term) functioning on their basis, as well as the timing of repair operations, their level and the required level of repair equipment.

In practice, in the real conditions of an industrial enterprise, the task of technical assessment of the operability of a particular object is set in another plane, based on the equipment, for example, of the plant with diagnostic tools, the presence of highly qualified specialists who are able to assess the condition of the object and give accurate and strict target indications for the nature of further use of equipment and its operating modes, based on the duration of operation of the equipment, its maintainability, as well as the availability of backup equipment and the degree of its availability.

Keywords: technical condition, electromechanical system, diagnostics.

1. Введение

Вопросы связанные с оценкой технического состояния электромеханических систем приобретают в последнее время большую популярность в связи с повышением требований безотказности к электромеханическим системам (ЭМС) и обширными возможностями систем контроля и защиты. Возможные варианты решений весьма разнообразны. В работе [1], предлагается контроль технического состояния тяговых электрических машин проводить, используя математическое моделирование энергетических показателей. Отличие поведения разработанных моделей и практики эксплуатации с внезапными, внеплановыми режимами и действиями персонала вполне очевидно. Ранее [2], предлагалось объединить программную и аппаратную реализацию алгоритмов сбора и обработки текущих измерений, построения оценок состояния системы в реальном времени и разработать экспериментальную методику гарантированного оценивания состояния ЭМС с асинхронным двигателем в реальном времени.

Для шаровых мельниц наиболее часто отмечаются [3, 4] износ шаров и брони барабана, перегрев подшипников, вибрация, износ зубьев, налипание пыли на обмотку статора. Ранее была разработана методология [5], позволяющая оценить эксплуатационную надежность электрических машин с точки зрения системного анализа в виде «дерева цели». Для оценки технического состояния турбогенератора и силового трансформатора предложен расчет индекса технического состояния на основе весовых показателей функциональных узлов [6]. Вопросы многосвязного асинхронного электропривода с векторным управлением и нежесткой механикой стали объектом рассмотрения кандидатской диссертации [7]. В тоже время работа, объединяющая, все указанные подходы отсутствует, что и стало основной целью данной статьи.

2. Постановка проблемы

Большая часть электрооборудования, эксплуатируемого на предприятиях, получает питание от источников среднего напряжения. Для защиты источников и потребителей могут использоваться следующие виды защит: максимальная токовая ($I >$); направленная токовая ($I \leftarrow$); максимальная защита от токов нулевой последовательности ($I_N >$); защита от максимальной обратной составляющей ($I_i >$); тепловая защита (I_{\square}); дифференциальная защита (ΔI); дифференциальная земляная защита (ΔI_N); защита от минимального напряжения ($U <$); защита от максимальной и минимальной частоты ($>f >$); защита от максимального напряжения ($U >$); защита от обратной активной мощности ($P \leftarrow$); защита от обратной реактивной мощности ($Q \leftarrow$); защита от максимального напряжения нулевой последовательности (\circ/\square); защита Бухгольца (Buchholz) ($U_N >$).

3. Основной материал

Как мы видим, из перечня защит, ни одна из них не даёт прямого ответа на вопрос о техническом состоянии ЭМС, а лишь косвенно свидетельствуют о функционировании системы при условии, что контролируемые величины не превышают допустимых. Одной из основных задач защит является не допустить попадания персонала под возможные электрические и механические опасные ситуации. Чтобы защитить персонал и оборудование, защиты должны обладать быстроедействием, селективностью и надёжностью.

С другой стороны, при выборе защит часто идут на технико-экономический компромисс при выборе между безопасностью и наличием электропитания. Наиболее неблагоприятными ситуациями при эксплуатации электродвигателей являются: перегрузка (кратковременная или длительная), короткие замыкания, провалы напряжения, неравномерность напряжения по фазам, перегрев и др. С учётом того, что в промышленности подавляющее число приводных двигателей – это асинхронные двигатели (АД) мощностью до 100 кВт, то для них, кроме отмеченных выше неблагоприятных ситуаций, следует добавить межвитковые замыкания, одно, двух и трёхфазные короткие замыкания. Пусковые токи у АД с короткозамкнутым ротором лежат в пределах $4 \dots 8 I_n$, возможен перегрев роторов при затянувшемся пуске.

Очевидно, что вне режимов работы ЭМС, наличие различных видов защит, вопросы оценки её технического состояния (или диагностирования) стоят по уровню решаемых задач значительно выше. Можно привести в этом направлении простую схему, из которой видно значение и уровень системы диагностирования (рисунок 1).

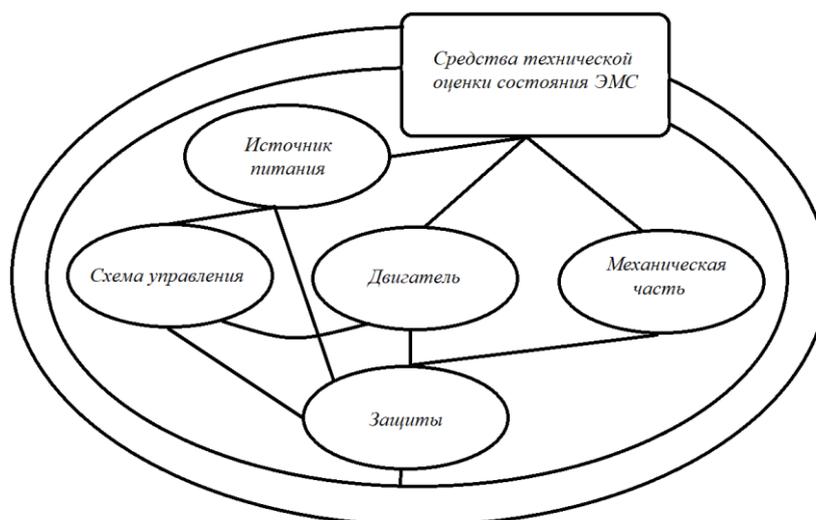


Рисунок 1. Иерархическая структура обобщённой ЭМС.

Такие структуры используются повсеместно для ЭМС, только оценка технического состояния (ТС) производится по одному показателю – отсутствие срабатывания защит, «зелёная индикация» на световом табло системы. Такая ситуация возможна даже при наличии развития неисправностей сразу в нескольких звеньях ЭМС. Если, увеличился шум редуктора, стало заметно биение муфты, появились продольные колебания ротора двигателя – в этом случае необходимо проведение вибродиагностического контроля (измерение составляющих вибрации, включая общий уровень, спектральный анализ, анализ временных реализаций и сравнение с допустимыми для данного класса механизмов).

Исходя из опыта эксплуатации ЭМС, можно привести типовые наборы защитных устройств в зависимости от мощности приводных двигателей, типа двигателя и характера его исполнения. Для машин малой мощности подключение к сети возможно с помощью рубильника, в силовой цепи устанавливаются плавкие предохранители, в схеме управления предусматривается нулевая защита. При использовании автоматического выключателя дополнительно имеем максимальную токовую (МТЗ) и тепловую защиту (ТЗ). Причём, для АД с короткозамкнутым ротором МТЗ не должна срабатывать в пусковых режимах двигателя.

В случае мощных машин и в зависимости от приводного механизма число защит может возрастать до пяти – шести. К их числу следует отнести, кроме МТЗ и ТЗ, защиту от минимального и максимального напряжений (МинНЗ, МакНЗ), защиту от минимальной и максимальной частоты (МинЧЗ, МакЧЗ), а также защиты от обратных активной и реактивной мощностей ($P_{актобр}$, $Q_{реактобр}$).

Число приводных двигателей для реальных промышленных механизмов может лежать в довольно широком диапазоне – от одного – двух до нескольких десятков. Такие механизмы, как поворот экскаватора-драглайна, в зависимости от ёмкости ковша и длины стрелы может содержать от четырёх до восьми мощных двигателей постоянного тока; привод наклона конвертора (для средней и большой ёмкости) использует от четырёх до шести двигателей постоянного или переменного тока. Отводящие рольганги широкополосных станков могут иметь 40...50 и более приводных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с питанием от преобразователей частоты. Примеры разветвлённой электромеханической системы могут иметь вид, показанный на рисунке 2.

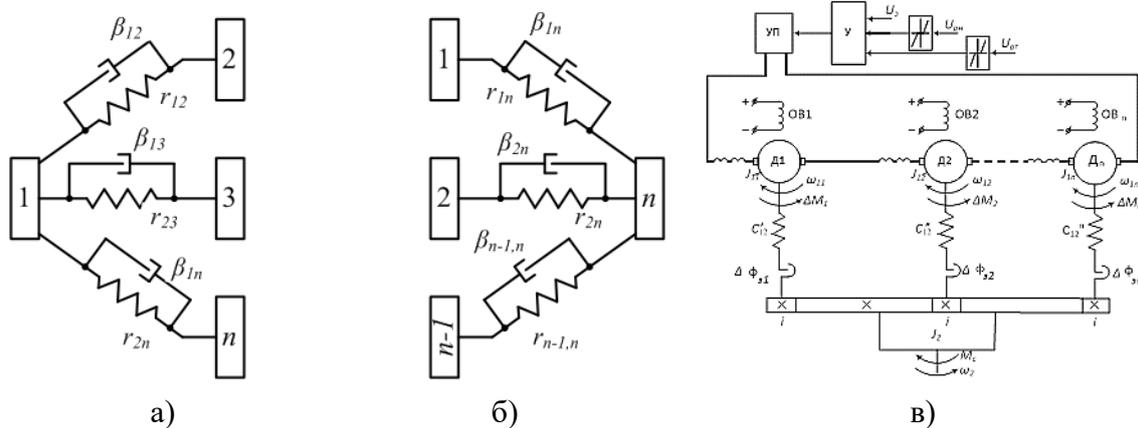


Рисунок 2. Типовые расчётные механические схемы: а) разветвление первого рода; б) разветвление второго рода; в) пример расчётной схемы механизма поворота экскаватора.

Приведенные схемы на рисунках 1 и 2 дополняют друг друга, но не дают представления об электромеханических процессах в системе. Выход ЭМС из строя объясняется ухудшением состояния электрических и механических звеньев – ухудшением состояния изоляции электродвигателей, перегревом отдельных звеньев (блоков) двигателя, износом подшипниковых узлов двигателя, редуктора и исполнительного механизма, накоплением усталостных деформаций (на уровне точки бифуркации) в промежуточных механических звеньях.

Техническая система имеет возможность полностью реализовать все функции в пределах заданных параметров только при работоспособном состоянии всех подсистем. Работоспособное состояние (РС) технической системы Q , состоящей из подсистем A, B, C , обеспечивается одновременным нахождением в работоспособном состоянии каждой из подсистем и работоспособным взаимодействием между ними. Некоторые из взаимодействий имеют приоритетное, некоторые второстепенное значение. Технологическая машина может быть определена как сложная система восстанавливаемых разноресурсных элементов, имеющих определённый уровень взаимодействия и находящихся под воздействием человеческого фактора, реализующего разрушительные или восстанавливающие действия.

Примером алгоритма для оценки технического состояния ЭМС может служить схема, приведенная на рисунке 3. В этой схеме выделены электрические и механические воздействия, а также последствия их взаимодействия и, как результат, переход к критериям состояния.

Одним из способов оценки технического состояния ЭМС является определение коэффициента ухудшения надёжности её составляющих. Если при вводе в эксплуатацию ЭМС коэффициент надёжности составлял, например, $K_{над\Sigma} \approx 0,985$, то по мере функционирования эта величина будет падать и может достичь значения $K_{над_крит}$, при котором состояние объекта, которое может привести к отказу, травмам работающего персонала, значительному материальному ущербу или другим неприемлемым последствиям. Т.е. необходимо задаться значением $K_{над_крит}$, при достижении которого система будет отключаться для проведения ремонтных операций. После реновации и проверки правильности функционирования система может быть вновь введена в работу. При последовательном

расположении подсистем *A, B*, Суммарный коэффициент надёжности определяется произведением:

$$K_{над\Sigma} \approx K_{надA} \cdot K_{надB} \cdot K_{надC} \cdot \dots \cdot K_{надi}, \tag{1}$$

где под $K_{надA}$, $K_{надB}$, $K_{надC}$, $K_{надi}$ понимаем надёжность источника питания, двигателя, промежуточных механических звеньев, исполнительного механизма, системы управления, наблюдателя состояния, средств контроля и защиты и др. Из этого многообразия элементов необходимо выбрать те, что в первую очередь повлияют на состояние системы и на возможность её отключения. К числу таких звеньев относим изоляцию двигателя, промежуточные механические звенья (валы, редукторы, подшипники), нагрузка на двигатель со стороны исполнительного механизм.

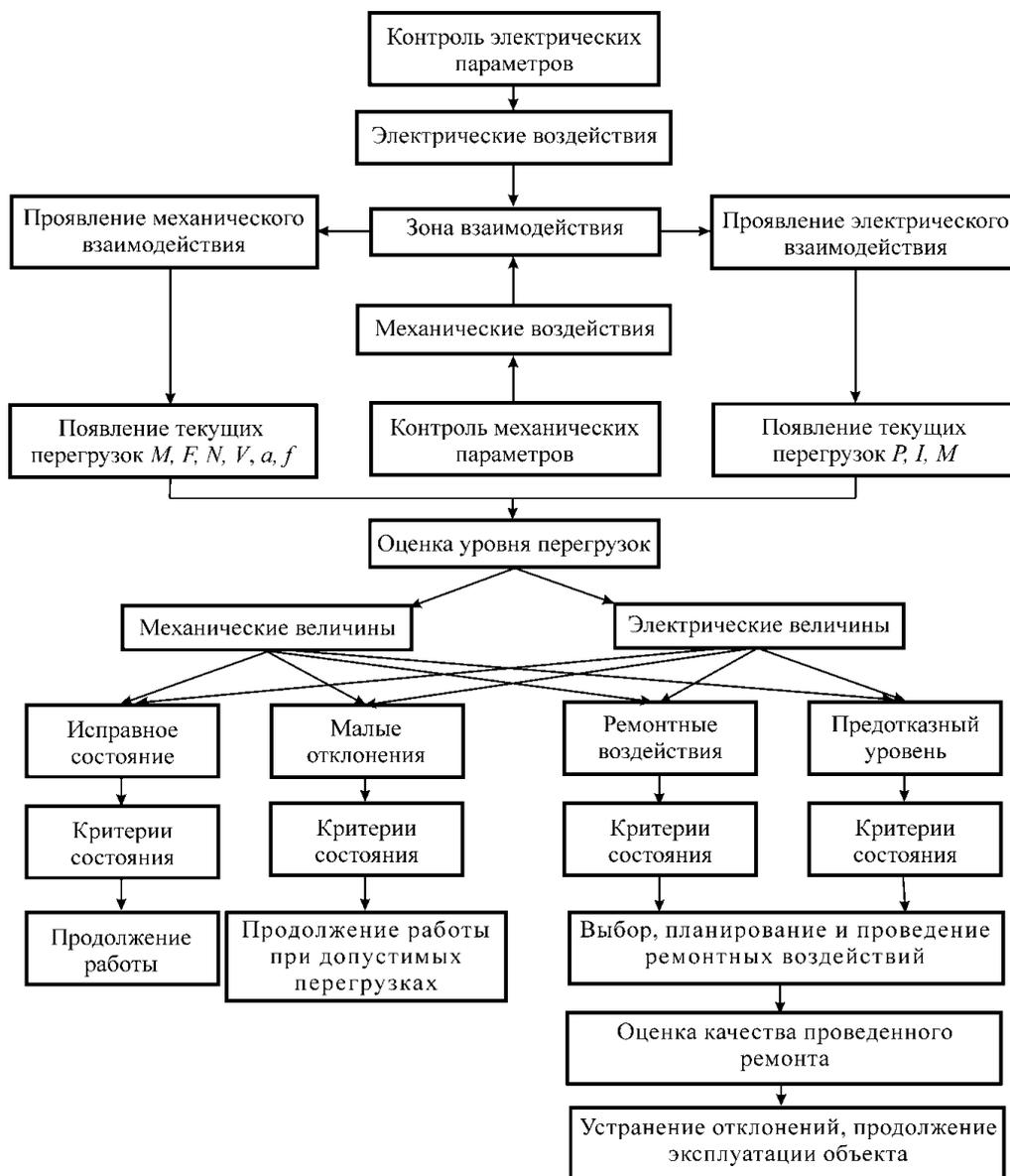


Рисунок 3. Алгоритм диагностирования технического состояния ЭМС

Первым звеном была отмечена изоляция. Для различных типов изоляции существуют время-нагрузочные кривые, из которых для различных режимов работы двигателя можно определить ресурс работы и перевести его в коэффициент снижения надёжности. Имея данные о потерях двигателя и режимах его работы, времени функционирования, оценивается состояние изоляции и её остаточный ресурс – откуда определяются коэффициент ухудшения состояния изоляции и её надёжности $\Delta K_{над_изол.}$.

Аналогично, на базе данных об упругих моментах ($M_{упрi}$) и их близости к точке бифуркации находится коэффициент ухудшения надёжности механической системы (механизма) $\Delta K_{над_мех.}$. Основанием для этого может стать коэффициент динамичности, определяемый как отношение динамических текущих показателей системы к номинальным (расчетным). Например, при захвате слитка прокатной клетью, комбинированный редуктор привода испытывает дополнительные динамические нагрузки, которые проявляются во временной форме вибрационного сигнала (рисунок 4а) и в нагрузочных характеристиках двигателя (рисунок 4б). Следовательно:

$$\Delta K_{над_мех.} = (K_{над_мех_тек.} - K_{над_мех_нач.}) / K_{над_мех_нач.}; \quad (2)$$

$$K_{над_мех_тек} = A_{дин} / A_{ном} \quad (3)$$

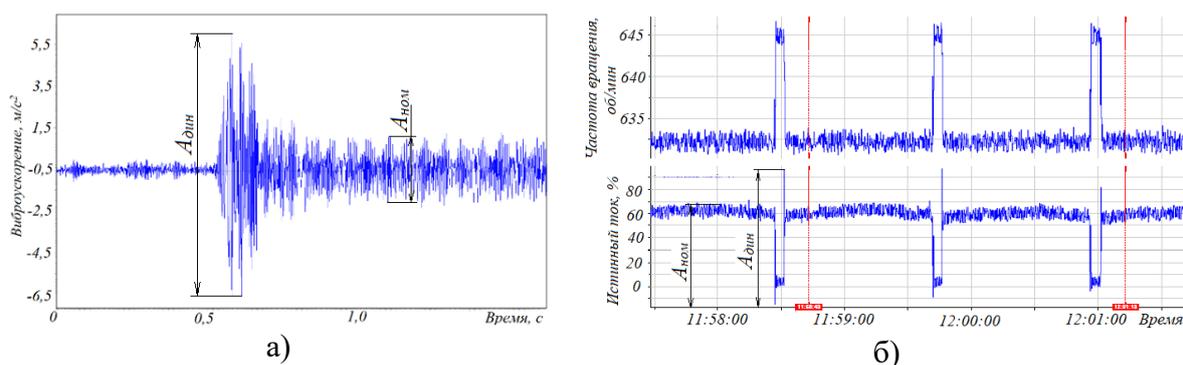


Рисунок 4. К оценке коэффициента ухудшения надёжности механической системы: а) сигнал виброускорения; б) ток и частота вращения двигателя.

Параллельно ведётся оценка вибрационных показателей в контрольных точках основных звеньев механической системы – $V_{тек_вibr} \leq V_{доп_вibr}$ (мм/с), $a_{тек_вibr} \leq a_{доп_вibr}$ (м/с²) – и переход к ухудшению надёжности системы по вибропоказателям $\Delta K_{над_вibr.}$. Далее $\Delta K_{над_изол.}$, $\Delta K_{над_мех.}$, $\Delta K_{над_вibr.}$ вводятся в блок определения суммарного коэффициента ухудшения состояния системы, после чего $K_{над_ухуд_с}$ сравнивается с $K_{над_ухуд_доп}$ для данного класса механизмов и систем. Результат сравнения – система может продолжать работу или подлежит остановке, реновации, проверке функционирования и возможному, в дальнейшем вводу в эксплуатацию. Вид схемы для оценки технического состояния ЭМС приведен на рисунок 5. Её можно несколько видоизменить, используя понятие допустимого коэффициента динамичности $K_{динi_доп}$. Схема дополняется расчетным узлом, из которого значения упругих моментов ($M_{упр}$) поступают в блок определения текущего $K_{динi}$, последний сравнивается с допустимым для него значением, рисунок 6.

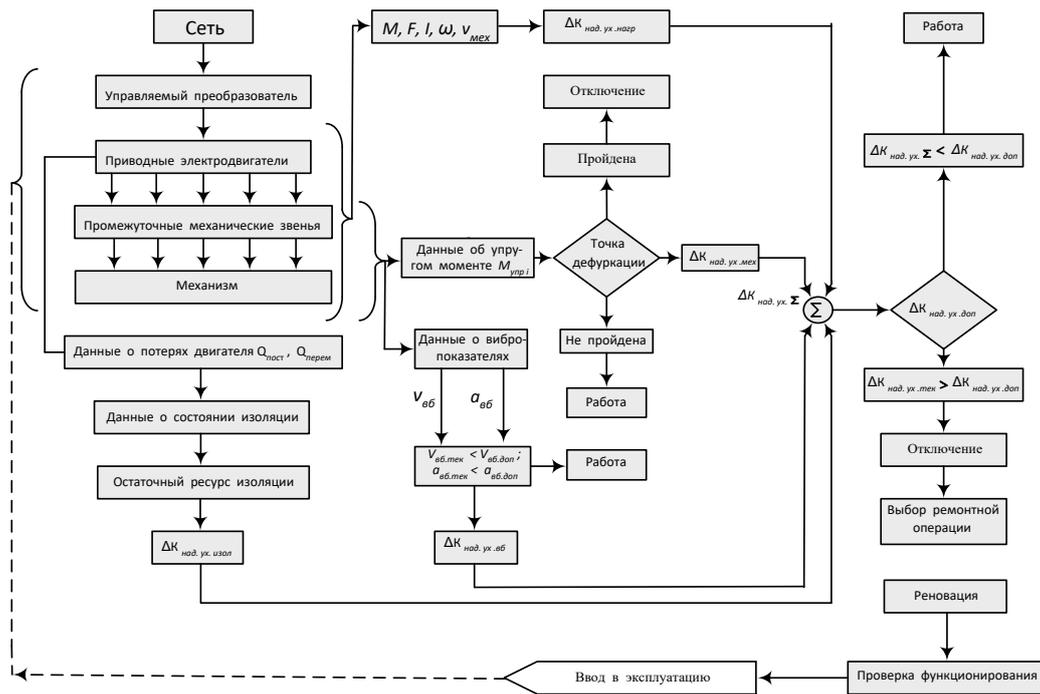


Рисунок 5. Алгоритм оценки текущего состояния ЭМС по величине $\Delta K_{над.ух.}$

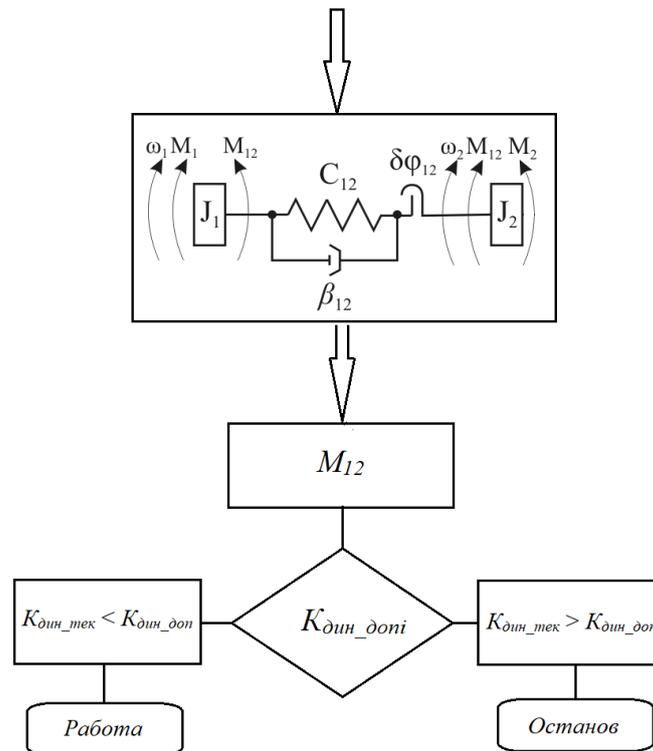


Рисунок 6. Узел оценки технического состояния ЭМС по величине $K_{дин_доп}$ для двухмассовой системы

Для создания диагностического комплекса необходимо, в первую очередь, иметь блок выделения текущих величин, к которым следует отнести токи якорей (статоров) I_1, I_2, \dots, I_n ; потери в двигателях (постоянные $Q_{пост}$, переменные $Q_{перем}$), частоты вращения двигателей $\omega_{\delta 1}, \omega_{\delta 2}, \dots, \omega_{\delta n}$ и углы их поворота $-\varphi_{\delta 1}, \varphi_{\delta 2}, \dots, \varphi_{\delta n}$; частоты вращения узлов механизма – $\omega_{M1}, \omega_{M2}, \dots, \omega_{Mn}$; данные о вибрации двигателей $-V_{\delta 1}, V_{\delta 2}, \dots, V_{\delta n}, a_{\delta 1}, a_{\delta 2}, \dots, a_{\delta n}$; температуру двигателей $-\tau_{\delta 1}, \tau_{\delta 2}, \dots, \tau_{\delta n}$. При работе двигателей на линейных участках механических характеристик расчёт движущего момента не вызывает проблем $-M \equiv I$.

В случае многомассовой расчётной схемы необходимо определение угла закручивания вала: $\Delta\varphi_{1-2} = \varphi_1 - \varphi_2$; $\Delta\varphi_{2-3} = \varphi_2 - \varphi_3 \dots \Delta\varphi_{(n-1)-n} = \varphi_n - \varphi_{n+1}$, а затем нахождение упругих моментов $M_{упр1-2}, M_{упр2-3}, M_{упр(n-1)-n} = \varphi_n - \varphi_{n+1}$ ($M_{упр} = c_{мех} \cdot \Delta\varphi$).

Контроль температуры двигателя (или её расчёт) возможен в случае упрощённой одно массовой тепловой модели – $\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-t/T})$, $\tau_{нач} = 0$. В случае нестационарного нагружения и тяжёлых условий работы двигателя необходимо прибегнуть к много массовой тепловой схеме замещения – число расчётных масс, обычно не превышает 5...7. В ряде случаев, по требованию заказчика, в двигателе устанавливаются датчики температуры и их данные передаются на мнемосхему или пульт оператора, а также вводятся в схему защит. Блок-схема, учитывающая отмеченное выше, приведена на рисунке 7, за исключением узлов подключения двигателей к управляемому преобразователю, подразумевается, что они находятся в блоке выделения текущих величин.

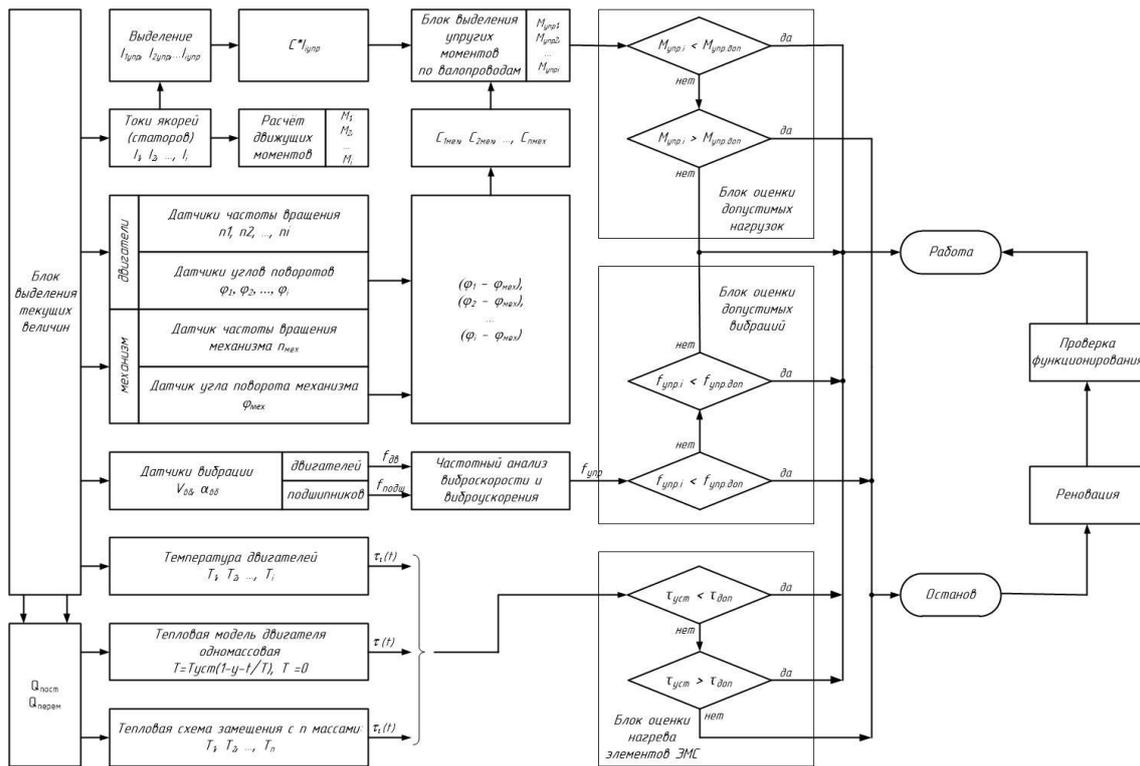


Рисунок 7. Блок-схема диагностического комплекса

Реализация предлагаемого диагностического комплекса в промышленности (а не в лабораторных условиях) возможна при наличии высококвалифицированного персонала, а также данных о конструктивных особенностях механической части (передаточные числа, материал валов, жёсткости, частоты вращения, типоразмеры подшипников, число зубьев и др.) и электродвигателя (постоянные нагрева и охлаждения для одно

массовой тепловой модели двигателя, данные о материалах и проводимости отдельных звеньев и узлов двигателя при составлении тепловой схемы замещения двигателя.

Контроль за вибрационными показателями реализуется по обычной программе – используются пьезоэлектрические датчики с магнитным креплением в одно- или много канальном исполнении в комплекте с анализатором вибрации и компьютерными программами для обработки вибрационного сигнала.

Примеры ЭМС при двух и более приводных электродвигателях постоянного тока с независимым возбуждением, при последовательном и параллельном соединении якорей (типовые схемы для приводов механизмов поворота экскаваторов и наклона конвертеров), получающим питание от управляемых преобразователей, приведены на рисунке 8. При последовательном соединении якорей идёт автоматическое выравнивание нагрузки на двигатели (если $r_{я1} \neq r_{я2}$), а при параллельном подключении якорей – привод обладает лучшими демпфирующими свойствами. Выбор схемы подключения зависит от мощности приводов, характера нагружения и режима работы ЭМС.

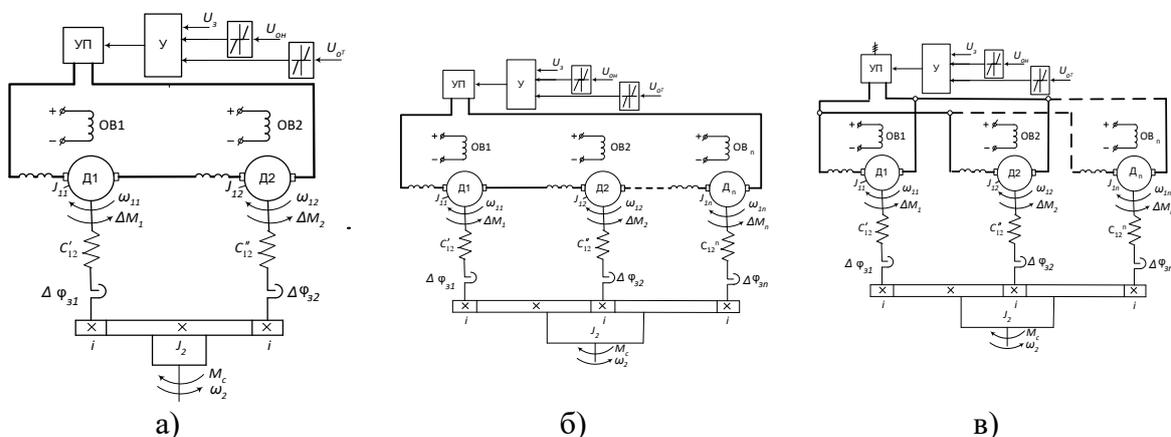


Рисунок 8. Электромеханические схемы для двух- и n -приводных электродвигателей при последовательном (а, б) и параллельном (в) соединениях якорей

Осциллограмма пуска 4-х двигательного привода механизма поворота экскаватора приведена на рисунке 9. Показательными являются колебания угловой частоты вращения двигателя на этапе интенсивного набора скорости, а также при переходе в режим замедления. Этим участкам соответствуют зоны колебаний упругого момента, причём, при активном наборе скорости $M_{упр}$ имеет один знак, а при переходе в режим замедления – обратный.

На данной осциллограмме (рисунок 9) наблюдается образование зазоров в момент изменения знака ускорения (переход к замедлению). Очевидно, что на начальном этапе замедления колебания частоты вращения и упругого момента выше, чем на том же этапе пуска. Данные переходные этапы являются наиболее информативными при диагностировании общего состояния ЭМС.

Термограммы, приведенные на рисунке 10 позволяют судить о тепловом состоянии двигателей и возможности дальнейшего функционирования машин. Термограммы 10а, 10б, дают возможность получить общее заключение о тепловом состоянии двигателя. Информация на термограммах 10в, 10г должна быть использована при планировании ремонтных и профилактических работ, что определяется степенью перегрева рядом расположенных деталей.

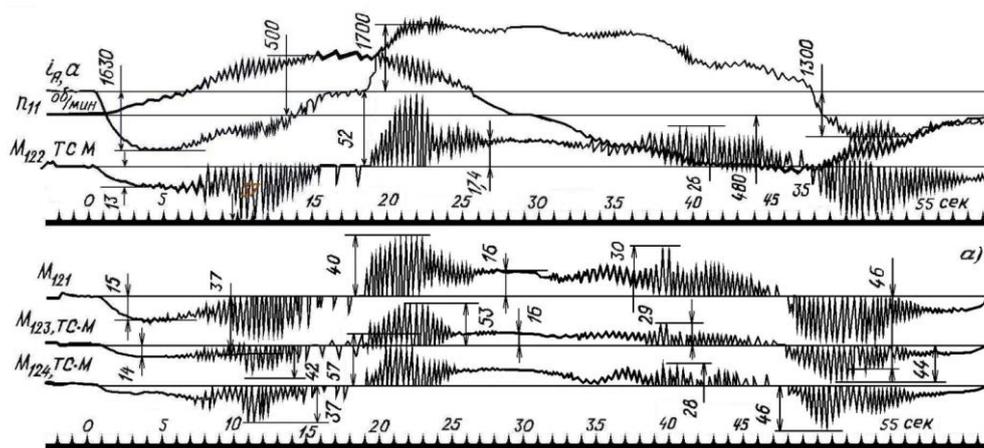


Рисунок 9. Пуск 4-х двигательного привода механизма поворота экскаватора

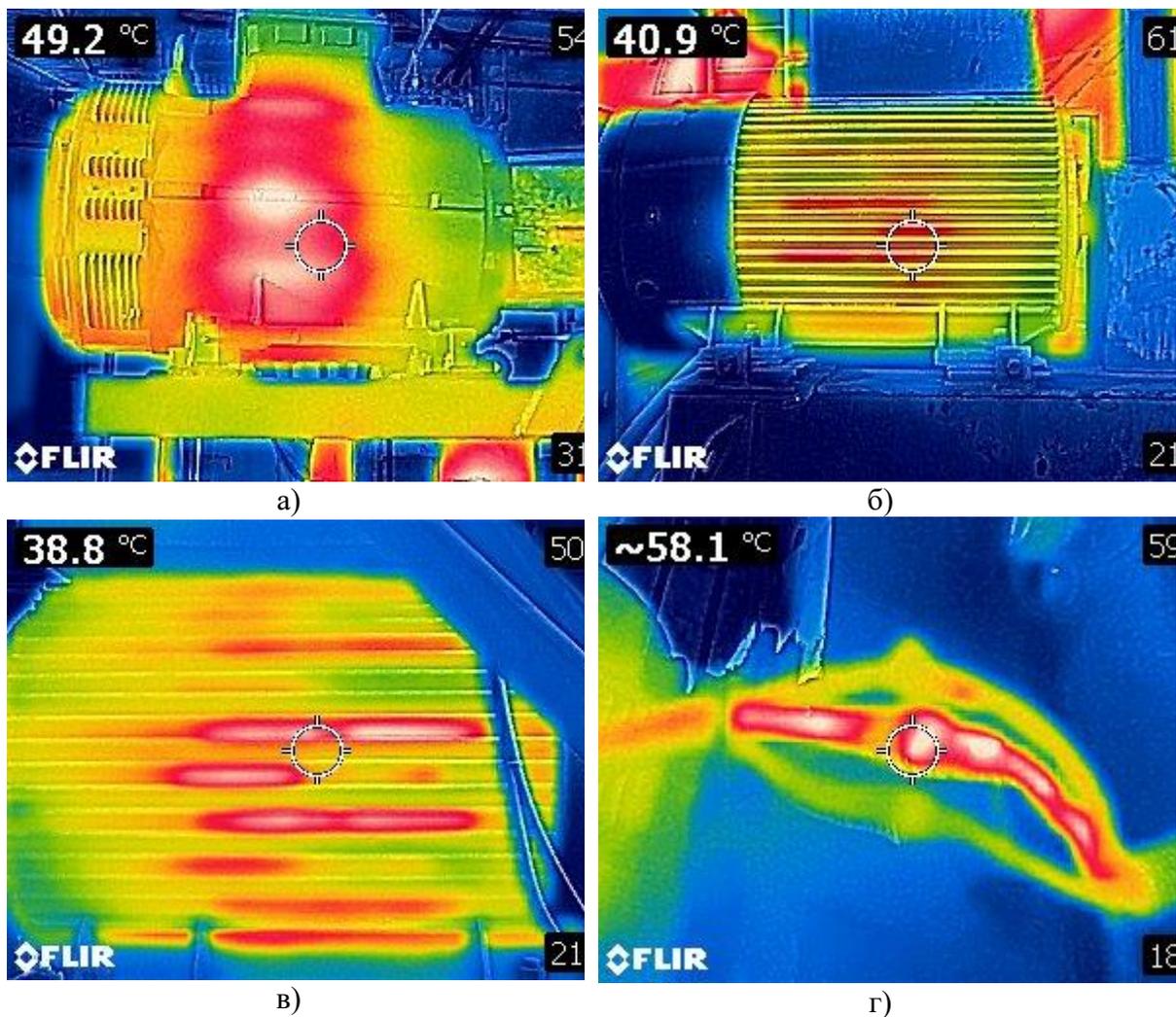


Рисунок 10. Тепловое изображение двигателя: а) нагрев статорных обмоток; б, в) местные перегревы статора; г) нагрев одной фазы питания

В части механической проявления повреждений ЭМС в целом соответствуют традиционным представлениям по вибрационному диагностированию: измерение общего уровня – среднеквадратичного значения виброскорости в частотном диапазоне 10...1000 Гц и среднеквадратичного и пикового значений виброускорения в частотном диапазоне 10...5000 Гц в трёх взаимно перпендикулярных направлениях, анализ спектров виброскорости, виброускорения, огибающей и временной формы вибрационного сигнала и др.

4. Заключение

1. Впервые предложен алгоритм оценки технического состояния сложной разветвленной много массовой электромеханической системы, учитывающий механическую и электрическую составляющие.

2. Предложен способ оценки технического состояния сложной ЭМС по величине ухудшения коэффициента надежности обобщенной системы, включая оценку его текущего коэффициента динамичности.

3. Дан вариант устройства контроля текущего состояния ЭМС и алгоритм его реализации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Менщиков И. А. Оценка технического состояния электромеханических систем с помощью энергетических показателей // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2018. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-tehnicheskogo-sostoyaniya-elektromehnicheskikh-sistem-s-pomoschyu-energeticheskikh-pokazateley>.

2. Яфасов, Ф. И. Оценивание состояния и функциональное диагностирование электромеханической системы с асинхронным двигателем: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.13.01 / Казан. гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева. - Казань, 2005. - 18 с.

3. Бестужева, О. В. Прогнозирование остаточного ресурса опорных цапф шаровой мельницы с учетом напряженно-деформированного состояния: автореферат дис. ... 05.02.13 / Бестужева Ольга Васильевна; [Место защиты:]. - Белгород, 2019. - 18 с.

4. Гамидов Ф. М. Определение оптимальных параметров конструкции подъемных лифтеров в шаровых мельницах типа SAG MILL // НАУ: сетевой научный журнал. 2020. № 51-1 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-konstruktsii-podemnyh-lifterov-vsharovyih-melnits-tipa-sag-mill> (дата обращения: 29.07.2023).

5. Гусев В. В. Методологические предпосылки к оценке эксплуатационной надежности электрических машин // Известия ТПУ. 2008. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-predposylki-k-otsenke-ekspluatatsionnoy-nadezhnosti-elektricheskikh-mashin> (дата обращения: 26.04.2024).

6. Байдюк М. А., Комарова Г. В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин. ЖУРНАЛ: ИЗВЕСТИЯ СПБГЭТУ ЛЭТИ. Номер: 3 Год: 2019 Страницы: 78-84

7. Гнездов, Н. Е. Многосвязный асинхронный электропривод с векторным управлением и нежесткой механикой: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Гнездов Николай Евгеньевич; [Место защиты: Иван. гос. энергет. ун-т]. - Иваново, 2009. - 18 с.

Поступила в редколлегию 07.02.2024

УДК 621.9.92:669.917.539.41

В. И. Бутенко, Р. Г. Кадач

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Тел./Факс: +7-928-600-57-61; E-mail: butenkowiktor@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Выполнены исследования влияния циклического термодинамического нагружения стальных образцов на их эксплуатационные свойства, такие как износостойкость и усталостную прочность. Показано, что совместное действие силового и температурного факторов приводит к увеличению интенсивности изнашивания поверхностного слоя при циклическом нагружении, а также снижает его сопротивляемость усталостному разрушению при совместном действии крутящего и изгибающего моментов.

Ключевые слова: термодинамическая усталость, конструкционная сталь, циклическое нагружение, износостойкость, усталостная прочность.

V. I. Butenko, R. G. Kalach**THE EFFECT OF THERMODYNAMIC FATIGUE ON THE PERFORMANCE PROPERTIES OF PRODUCTS MADE OF IRON-CARBON ALLOYS**

Researches have been carried out of the influence of cyclic thermodynamic loading of steel samples on their operational properties, such as wear resistance and fatigue strength. It has been shown that the combined action of force and temperature factors leads to an increase in the wear rate of the surface layer under cyclic loading, and also reduces its resistance to fatigue failure under the combined action of torsional and bending moments.

Keywords: thermodynamic fatigue, high-speed steel, cyclic loading, wear resistance, fatigue strength.

1. Введение

В процессе обработки деталей резанием обрабатываемый и инструментальный материалы подвергаются циклическому температурному воздействию и динамическому нагружению, включающему силу резания и её колебания, что является одной из основных причин вибрации технологической системы. Такое циклическое температурно - динамическое воздействие на обрабатываемый и инструментальный материалы оказывает влияние на качество получаемого поверхностного слоя обрабатываемой детали и стойкость используемого инструмента, что особенно чётко проявляется в изделиях из железоуглеродистых сплавов, так как они имеют сложную структуру, изменяющуюся под влиянием высоких значений температур и давлений в зоне резания [1, 2]. Учитывая, что углеродистые инструментальные стали и быстрорежущие стали имеют структуру и характер изменения свойств аналогичные конструкционным сталям, было принято допущение о том, что результаты исследования термодинамической усталости конструкционных сталей справедливы для инструментальных и быстрорежущих сталей.

Целью настоящих исследований является изучение влияния циклического термодинамического нагружения стальных образцов на их эксплуатационные свойства, оценивающиеся, например, износостойкостью и усталостной прочностью материалов деталей из железоуглеродистых сплавов и тому подобным.

2. Влияние циклического температурного воздействия на интенсивность изнашивания материала поверхностного слоя образцов

Исследования интенсивности изнашивания материала поверхностного слоя образцов из стали 12ХН3А проводились на машине трения с использованием дисковых образцов [3]. Испытания образцов на усталостную прочность осуществлялось с использованием образцов, имеющих диаметр рабочей части 10 мм, на специальной установке, описание которой приведено в работе [4].

В качестве контртел при исследовании интенсивности изнашивания материала поверхностного слоя образцов использовались кольцевые тела их быстрорежущей стали Р6М5, подвергнутые термической обработке до твёрдости $HRC\ 62\dots 65$ [3]. Предварительно рабочие поверхности исследуемых образцов и контртел подвергались шлифованию и имели шероховатость $Ra = (0,6 - 0,8)$ мкм.

Нагрев исследуемых образцов осуществлялся в муфельной печи ЭКСП-10, позволяющей устанавливать температуру нагрева в диапазоне от 200° до 1250°C . Цикл состоял из нагрева исследуемого образца в муфельной печи до заданной температуры и выдержки при ней в течение 1 мин с последующим охлаждением образца вне печи обдувом воздуха в течение 1 мин.

Исследования на интенсивность изнашивания материала поверхностного слоя образцов проводились без смазки на постоянных режимах трения: давление контактных поверхностей исследуемого образца и контртела $p = 0,428$ МПа ($P = 75$ Н), средняя скорость скольжения $V_{ск} = 0,1$ м/с ($n = 100$ об/мин). Вращение задавалось контртелу. Продолжительность контактного взаимодействия контртела с поверхностью исследуемого образца составляла 10 мин. Весовой износ образца определялся путём взвешивания его до и после испытания на аналитических весах мод. АД-200.

На рис. 1 приведены графики зависимостей интенсивности изнашивания образцов ΔI от числа циклов температурного воздействия n_θ при значениях температуры нагрева $\Theta_1 = 250^\circ\text{C}$ (кривая 1), $\Theta_2 = 300^\circ\text{C}$ (кривая 2) и $\Theta_3 = 350^\circ\text{C}$ (кривая 3). Анализ полученных зависимостей свидетельствует о существенном влиянии числа циклов температурного воздействия на интенсивность изнашивания материала поверхностного слоя образцов.

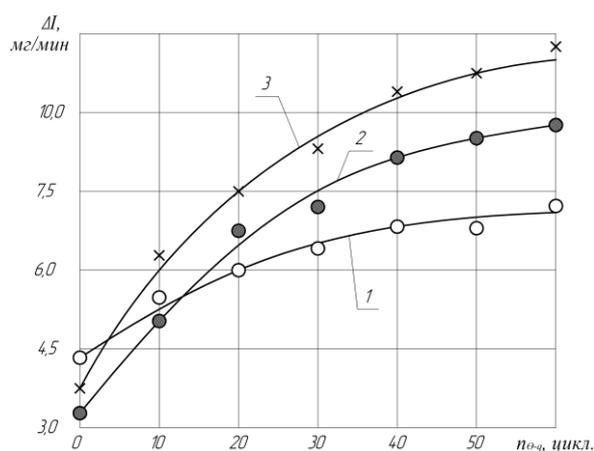


Рисунок 1. Зависимость интенсивности изнашивания материала поверхностного слоя образцов ΔI от числа циклов температурного воздействия n_θ 1 – $\Theta_1 = 250^\circ\text{C}$; 2 – $\Theta_2 = 300^\circ\text{C}$; 3 – $\Theta_3 = 350^\circ\text{C}$ (пара трения «сталь 12ХН3А – быстрорежущая сталь Р6М5», $p = 0,428$ МПа, $V_{ск} = 0,1$ м/с)

3. Влияние циклического температурного воздействия на усталостную прочность (выносливость) материала образцов

Влияние числа циклов температурного воздействия на усталостную прочность материала образцов оценивалось сопротивляемостью их действию крутящего и изгибающего моментов при различных значениях температур циклического нагрева. Образцы подвергались совместному воздействию крутящего $M_{кр}$ и изгибающего $M_{изг}$ моментов, равных $M_{кр} = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ($\tau_{кр} = 6 \text{ МПа}$) и $M_{изг} = 5 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ($\sigma_{изг} = 25 \text{ МПа}$). В качестве оценочного показателя было принято число оборотов образца N_o до его разрушения от совместного воздействия, крутящего и изгибающего моментов.

На рисунке 2 приведены графические зависимости изменения сопротивляемости образцов совместному действию, крутящего и изгибающего моментов по показателю.

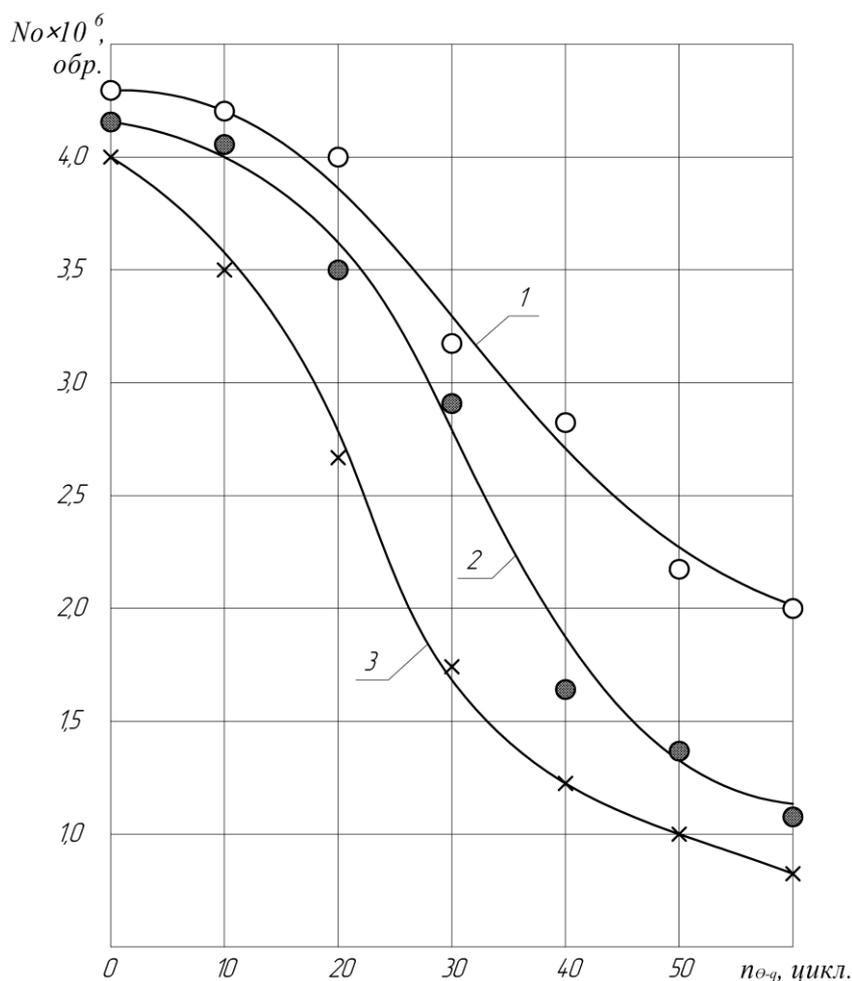


Рисунок 2. Зависимости сопротивления образцов совместному действию, крутящего и изгибающего моментов N_o от числа циклов температурного воздействия n_{Θ} : 1 - $\Theta_1 = 250^\circ\text{C}$; 2 - $\Theta_2 = 300^\circ\text{C}$; $\Theta_3 = 350^\circ\text{C}$ (сталь 12ХН3А, $M_{кр} = 1,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$, $M_{изг} = 5 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

N_o от числа циклов температурного воздействия на них n_{Θ} при различных значениях температуры нагрева: $\Theta_1 = 250^\circ\text{C}$ (кривая 1); $\Theta_2 = 300^\circ\text{C}$ (кривая 2); $\Theta_3 = 350^\circ\text{C}$ (кривая 3).

Анализ полученных результатов испытаний показывает, что циклическое температурное воздействие на материал образца также снижает его сопротивляемость уста-

лостному разрушению при совместном действии крутящего и изгибающего моментов. При этом сопротивляемость материала образцов усталостному разрушению снижается не пропорционально увеличению температуры циклического нагрева Θ .

4. Влияние величины циклической термо-силовой нагрузки на интенсивность изнашивания материала поверхностного слоя образцов при постоянной циклической температуре нагрева их

Для исследования влияния величины циклической нагрузки на интенсивность изнашивания материала поверхностного слоя образцов при постоянной циклической температуре нагрева использовалась специальная струбцина (рис. 3), позволяющая производить нагрев исследуемых образцов в муфельной печи, находящихся под нагрузкой. Для её создания использовался электрогидравлический пресс мод. Р 342М. В исследованиях образцы нагружались силами: $Q_1 = 1500$ Н ($q_1 = 0,315$ МПа), $Q_2 = 2000$ Н ($q_2 = 0,418$ МПа), , $Q_3 = 2500$ Н ($q_3 = 0,525$ МПа), Температура нагрева образцов в муфельной печи была принята постоянной и составляла $\Theta = 300^\circ\text{C}$.

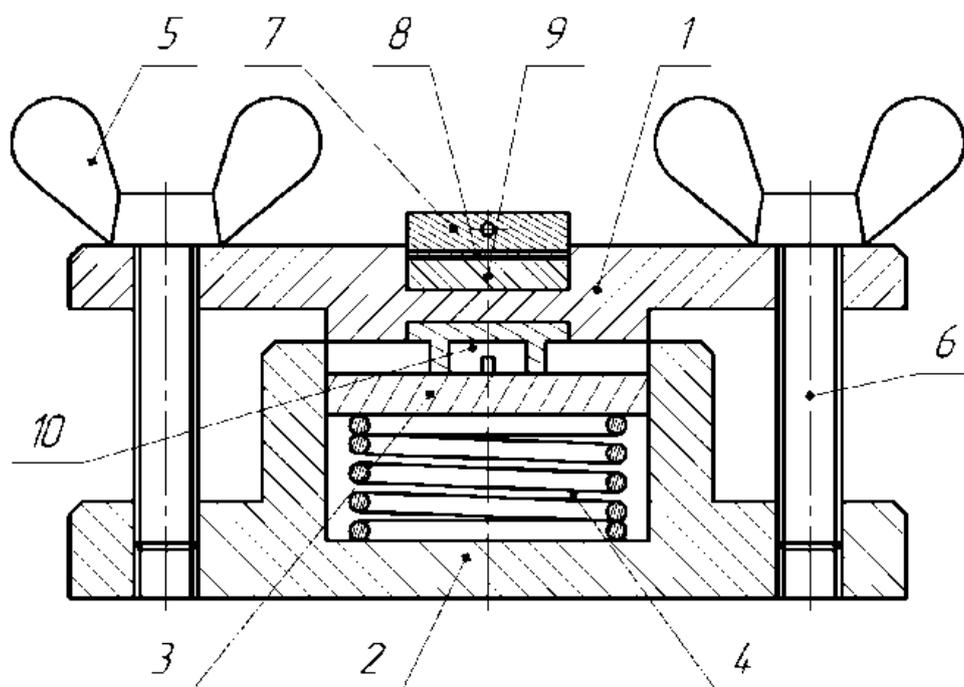


Рисунок 3. Схема струбцины для нагружения образцов: 1 – плита верхняя; 2 – основание; 3 – планка; 4 – пружина; 5 – гайка барашковая; 6 – винт; 7 – тензодатчик из тепло-непроводящего материала с тензорезисторами; 8 – образец для испытаний

Результаты выполненных исследований приведены на рис. 4, из анализа которого следует, что силовое нагружение материала образцов совместно с температурным воздействием приводит к увеличению интенсивности изнашивания поверхностного слоя образцов ΔI от числа циклов температурно-силового нагружения $n_{\theta-q}$. При этом увеличение интенсивности изнашивания ΔI при постоянной температуре нагрева пропорционально величине силового воздействия.

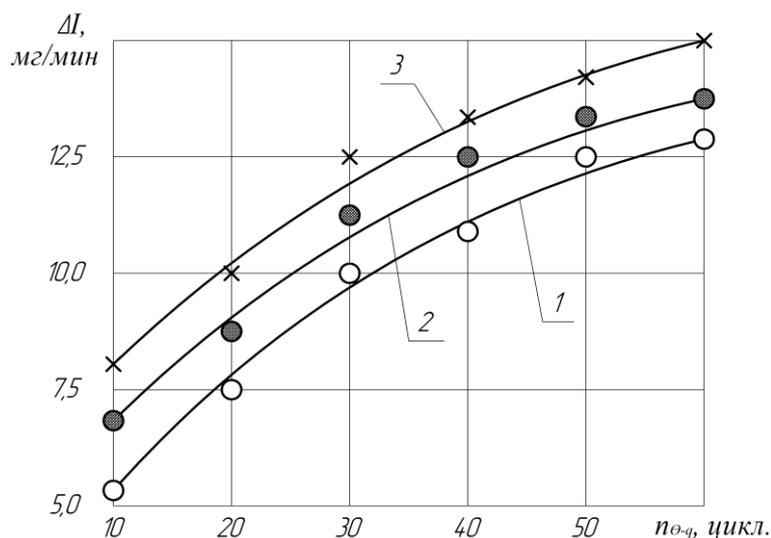


Рисунок 4. Зависимости изменения интенсивности изнашивания поверхности образцов ΔI от числа циклов температурно-силового нагружения $n_{\theta-q}$ при $\Theta = 300^{\circ}\text{C}$, $p = 0,428$ МПа, $V_{ск} = 0,1$ м/с: 1 – $Q_1 = 1500$ Н ($q_1 = 0,315$ МПа), $Q_2 = 2000$ Н ($q_2 = 0,418$ МПа), $Q_3 = 2500$ Н ($q_3 = 0,525$ МПа)

Уменьшение износостойкости и усталостной прочности материала образцов, по-видимому, можно объяснить изменением структуры материала образцов при циклическом температурно-силовом воздействии на него, приводящем к ослаблению межкристаллитных связей и появлением внутри него субмикротрещин [1, 5. 6]. Об этом свидетельствуют металлографические исследования материала поверхностного слоя образцов, подвергнутых термодинамическому нагружению (рис. 5)

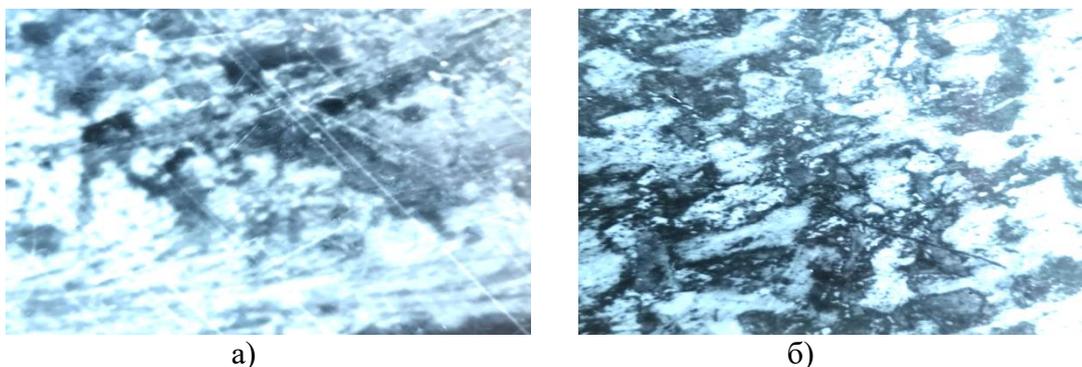


Рисунок 5. Фотографии структуры материала поверхностного слоя образцов из стали 12ХН3А в начальном состоянии (а) и после температурно-силового воздействия продолжительностью $n_{\theta-q} = 50$ циклов (б, $\Theta = 300^{\circ}\text{C}$, $Q = 2500$ Н). Увеличение 100

5. Заключение

Выполненные исследования влияния циклического температурного и термодинамического нагружения стальных образцов из стали 12ХН3А показали, что совместное действие силового и температурного факторов существенно влияют на интенсивность изнашивания и на усталостную прочность железоуглеродистых сплавов. Степень результирующего влияния данных факторов имеет функциональную зависимость от

числа циклов нагружения. Результаты исследований дают основания полагать, что установленная зависимость эксплуатационных свойств конструкционной стали от термодинамической усталости проявляется в инструментальных материалах, о чём свидетельствуют данные, приведённые в работе [2].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бутенко, В. И. Структура и потенциал трибоконтакта поликристаллических материалов / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2018. – 160 с.
2. Бутенко, В. И. Исследование влияния термодинамической усталости быстрорежущей стали на стойкость свёрл при различных способах заточки / В. И. Бутенко, Р. Г. Кадач. // Современные тенденции развития инструментальных систем и комплексов: сб. тр. Всероссийской (региональной) науч.-техн. конф. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2024. – С. 112 – 117. <https://ntb.donstu.ru/content/2024727>.
3. Бутенко, В. И. Научные основы нанотрибологии / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 275 с.
4. Бутенко, В. И. Отделочно-упрочняющая обработка деталей: технологии и их эффективность / В. И. Бутенко. – Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2020. – 220 с.
5. Кузнецов, В. П. Теоретическое обоснование и реализация наноструктурирующего выглаживания при обработке прецизионных прецизионных деталей из конструкционных сталей / Кузнецов Виктор Павлович: дисс. ... д-ра техн. наук; 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. – Курган, 2013. – 341 с.
6. Бутенко, В. И. Структура и свойства поверхностного слоя деталей трибосистем / В. И. Бутенко. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 367 с.

Поступила в редколлегию 05.02.2024

УДК 620.178.322.1

А. И. Веремейчик, О. М. Миширук, М. В. Нерода, Б. Г. Холодарь, К. Д. Миневич
Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь
Тел./ факс: +375-162-32-17-42; E-mail: vai_mrtm@bstu.by

ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 10Г2 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ

Проведено исследование зависимости характеристик прочности и пластичности образцов из конструкционной стали 10Г2 от режимов лазерного упрочнения и легирования. На противоположные плоскости образца с габаритными размерами 6 × 20 × 200 мм было нанесено 5 дорожек. Проведены испытания на растяжение. Установлено, что разрушение обработанных образцов во всех случаях носило вязкий характер с удовлетворительным уровнем разрушающих деформаций при напряжениях, превышающих предел прочности исходного материала. Диаграммы растяжения свидетельствуют о незначительном влиянии лазерной обработки на модуль упругости материала. Полученные результаты могут служить основой для изучения взаимосвязи между режимами нагрева лазерного луча и свойствами материала упрочненной зоны.

Ключевые слова: лазерное упрочнение, легирование, сталь, растяжение, скорость сканирования, прочность на разрыв, удлинение.

A.I. Veremeychyk, O.M. Mishchyruk, M.V. Neroda, B.G. Kholodar, K.D. Minevych

TENSILE TESTS OF 10G2 STEEL SPECIMENS AFTER LASER HARDENING AND ALLOYING

A study was carried out of the dependence of the characteristics of strength and ductility of samples made of structural steel 10G2 on laser hardening and alloying modes. On opposite planes of a sample with overall dimensions of 6 × 20 × 200 mm, 5 tracks were applied. Tensile tests have been carried out. It was established that the destruction of the treated samples in all cases was of a viscous nature with a satisfactory level of destructive deformations at stresses above the tensile strength of the original material. The tensile diagrams indicate a negligible effect of laser processing on the elastic modulus of the material. The results obtained can serve as a basis for studying the relationship between laser beam heating modes and the material properties of the strengthened zone.

Keywords: laser hardening, alloying, steel, stretching, scanning speed, tensile strength, elongation.

1. Введение

Актуальность проблем, связанных с влиянием режимов лазерного воздействия на структуру и свойства различных материалов, подтверждается многочисленными публикациями отечественных и зарубежных ученых. В основном исследования заключаются в определении влияния режимов лазерной закалки на износостойкость, а проблеме влияния лазерной обработки на прочностные характеристики и характеристики пластичности материала уделяется недостаточное внимание [1]. Работа посвящена исследованиям взаимосвязи между режимами нагрева лазерным лучом и прочностными характеристиками материала.

2. Основное содержание и результаты работы

Образцы для испытаний на растяжение были изготовлены из конструкционной стали 10Г2. Размеры образцов: толщина – 6 мм, ширина – 20 мм и длина – 200 мм (отклонения от указанных размеров учтены при обработке результатов). Образцы подвергались лазерной поверхностной обработке излучением волоконного иттербиевого лазера мощностью 1 кВт с объективом для фокусировки лазерного излучения, системой перемещения и сканирующей лазерный луч головкой [2] при различных режимах обработки (таблица 1). Для каждого режима закалки и легирования

использовалось три образца. На противоположных плоскостях образца с габаритными размерами 20x200 мм наносились 5 дорожек. Длина лазерных дорожек составила 170 мм. Обработка каждой дорожки осуществлялась с одной и той же стороны (рис. 1). Размер лазерного пятна равен 0,35 мм. Расстояние от поверхности образца до последнего дефлектора составило 450 мм. Для легирования на образцы предварительно наносилась смесь бора аморфного с ацетоном и клеем БФ-4.

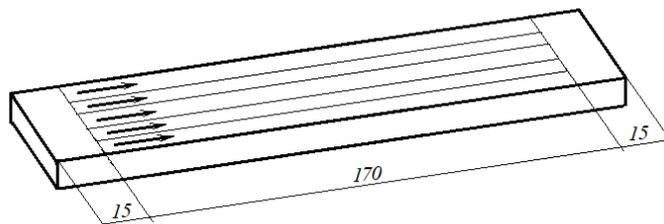


Рисунок 1. Схема движения лазерного пятна сканирования по поверхности образца

С помощью металлографического микроскопа «Альтами МЕТ 3С» проведены визуальные наблюдения структуры материала поверхности необработанных, закаленных и легированных образцов. Исследования закаленных образцов показали наличие поверхностных микротрещин в зоне дорожки, ориентированных преимущественно поперек оси симметрии образцов. Трещинообразование вызвано растрескиванием поверхностного слоя образца из-за возникших усадочных напряжений материала (рис. 2–4).



Рисунок 2. Структура необработанного образца 1

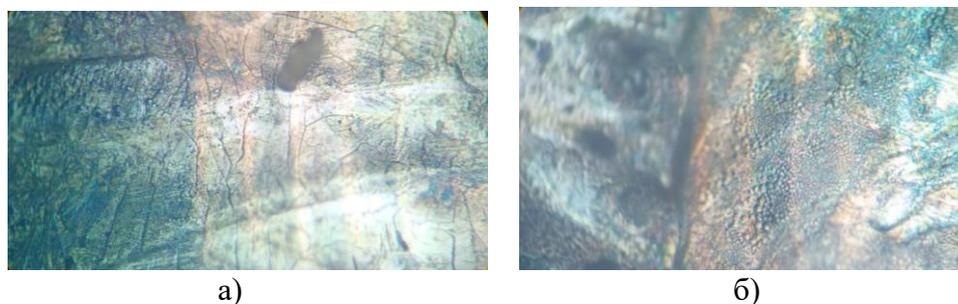


Рисунок 3. Структура закаленного образца 3.1: а – в закаленной зоне, б – между дорожками

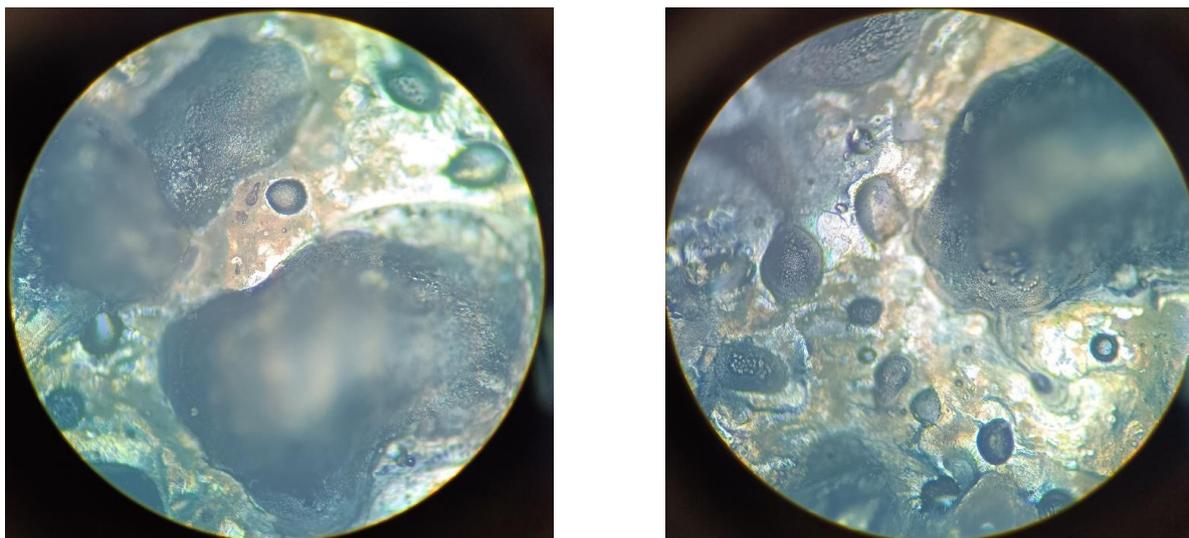


Рисунок 4. Структура легированного образца 6.1

Высокие скорости и градиенты термического воздействия в зоне обработки вызывают большую неоднородность процессов структурных превращений в термически активированном объеме и, как следствие, развитие дефектности структуры, что приводит к охрупчиванию материала и падению его деформативных свойств [4, 5].

Для определения прочностных характеристик образцы испытывались на статическое растяжение согласно ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» на машине разрывной Meitesi WDW-300 (Китай). Испытания образцов на растяжение проводились при нагружении со скоростью 5 мм/мин.

Таблица 1. Режимы лазерной обработки

Вид обработки	Пятно сканирования, мм	Количество линий, шт	Частота сканирования, Гц	Скорость сканирования V, мм/мин	Номер образца
Лазерная закалка	4 × 2,25	7	220	300	1а, 1б, 1в
				500	2а, 2б, 2в
				700	3а, 3б, 3в
Лазерное легирование				300	4а, 4б, 4в
				500	5а, 5б, 5в
				700	6а, 6б, 6в

Примечание: в графе «Номер образца» 1–6 – номер партии; а, б, в – номер образца в партии.

Разрушение необработанных (НО) и обработанных образцов происходило в пределах расчетной длины с образованием «шейки», уменьшением площади поперечного сечения в зоне разрыва и увеличением длины образца. Все закаленные и легированные образцы разрушились по сечениям, перпендикулярным направлению растягивающей нагрузки, а образцы, не подверженные лазерной обработке разрушились по сечениям, расположенным под углом к направлению растягивающей силы (рис. 5). Примеры разрушенных образцов и сечений разрушения приведены на рис. 6. На образцах присутствует значительный наклеп поверхностных слоев.

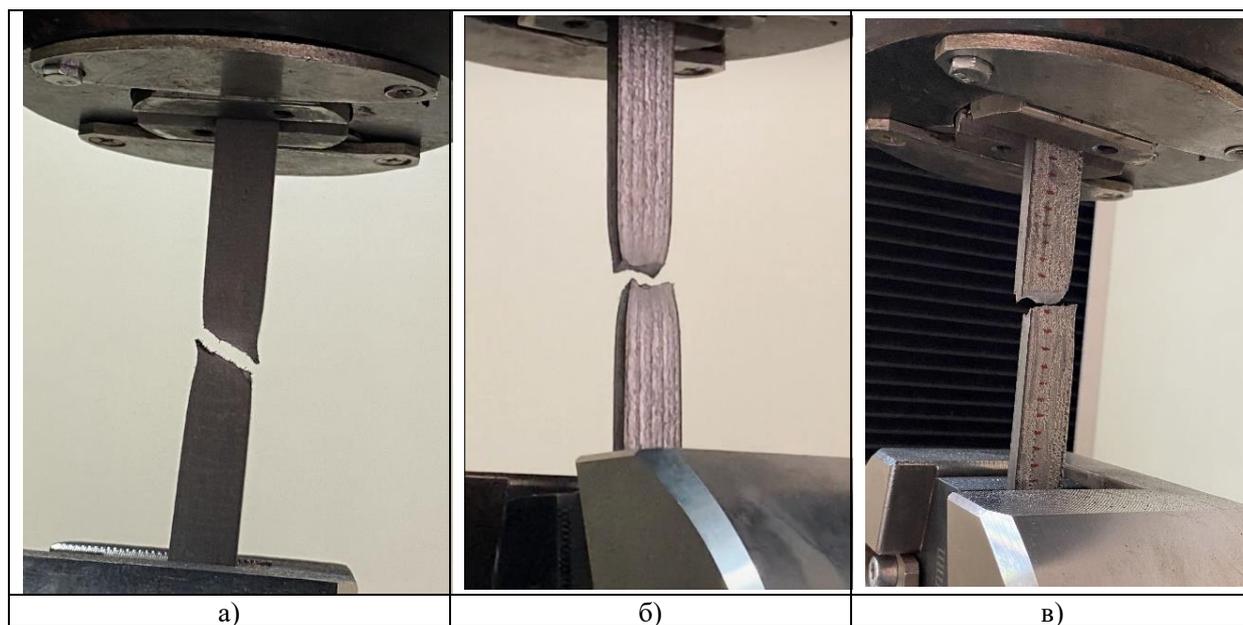


Рисунок 5. Испытания образцов материала на растяжение: а – необработанный образец, б – образец, закаленный лазером, в – образец, легированный лазером

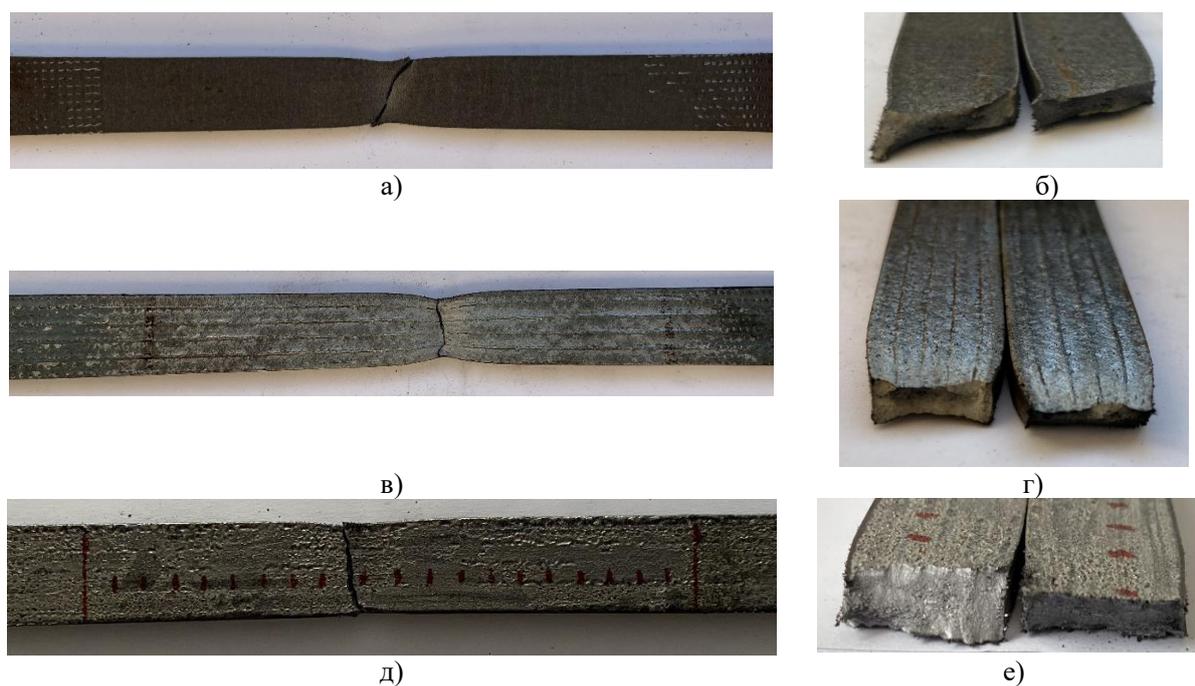


Рисунок 6. Разрушенные образцы (а, в, д) и сечение разрушения (б, г, е): а, б – образец НО2; в, г – образец 1б; д, е – образец ба

По результатам испытаний были определены временное сопротивление и относительное удлинение всех образцов. Данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Некоторые характеристики при испытании плоских образцов

Пятно сканирования, скорость продольного перемещения	Вид обработки	Номер партии	Маркировка	Временное сопротивление, σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ , %
-	-	НО	1	567	26
			2	567	31
			3	565	31
4 × 2,25 мм (7 линий) 300 мм/мин	Лазерная закалка	1	а	648	17
			б	625	19
			в	666	19
4 × 2,25 мм (7 линий) 500 мм/мин	Лазерная закалка	2	а	622	22
			б	628	23
			в	628	18
4 × 2,25 мм (7 линий) 700 мм/мин	Лазерная закалка	3	а	626	21
			б	628	20
			в	622	23
4 × 2,25 мм (7 линий) 300 мм/мин	Лазерное легирование	4	а	622	14
			б	624	12
			в	625	14
4 × 2,25 мм (7 линий) 500 мм/мин	Лазерное легирование	5	а	635	13
			б	667	15
			в	626	9
4 × 2,25 мм (7 линий) 700 мм/мин	Лазерное легирование	6	а	651	15
			б	644	14
			в	643	15

По результатам проведенных испытаний были построены зависимости возникающих в образцах напряжений σ от деформаций ϵ (рис. 7). Для удобства сравнения графиков выполнено их наложение на графики образцов, которые не подвергались лазерной обработке. Анализ диаграмм растяжения указывает на незначительное влияние в исследуемом диапазоне параметров скорости сканирования на величину модуля упругости материала. В то время как при лазерном легировании диаграммы растяжения указывают на более значительное влияние скорости лазерного сканирования на модуль упругости материала. Разрушение закаленных и легированных образцов произошло с незначительным снижением уровня разрушающих деформаций. Результаты испытаний показывают высокую степень повторяемости полученных зависимостей σ (ϵ).

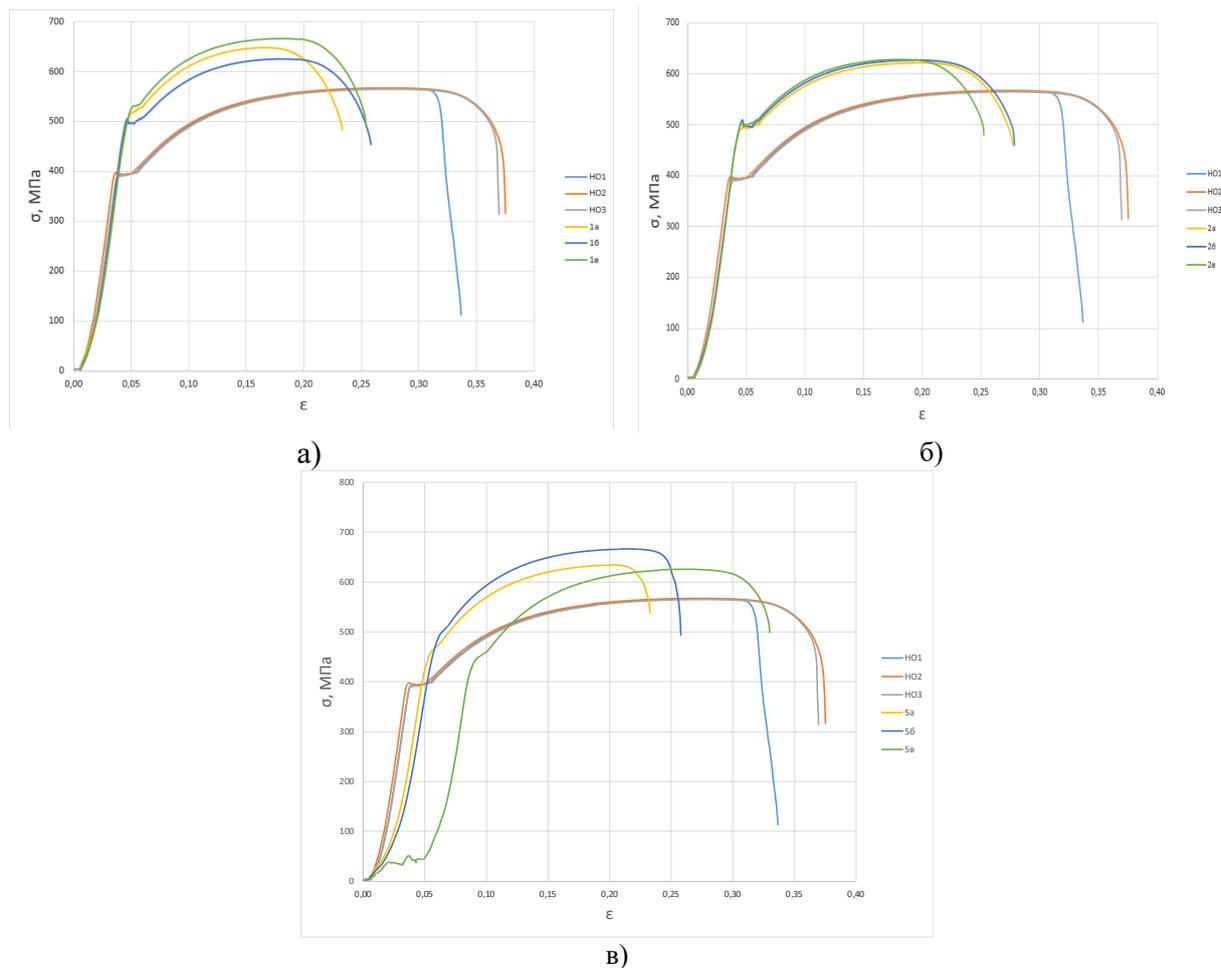


Рисунок 7. Зависимость возникающих в образцах стали 10Г2 напряжений (σ) от деформаций (ϵ): *a* – партия № 1, *b* – партия № 2, *c* – партия № 5

Результаты показывают [3, 4, 5], что максимальное напряжение для всех подвергнутых закалке и легированию образцов увеличилось в сравнении с необработанными образцами: на 14% для партий № 1, № 6; на 13 % для партии № 5; на 10 % для партий № 2–4. Следует отметить незначительное снижение характеристик пластичности стали 10Г2 при лазерной закалке: относительное удлинение закаленных образцов не превышает 17–23 % при аналогичном параметре для исходных образцов 31 %. При лазерном легировании характеристики пластичности снизились больше, чем в два раза: относительное удлинение легированных образцов составило 6–15 %. Снижение характеристик пластичности связано со значительным повышением твердости закаленной и легированной зоны и наличием микротрещин на ее поверхности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Mishchiruk, O. M. RESEARCH INTO THE INFLUENCE OF LASER SCANNING SPEED ON THE CHARACTERISTICS OF 10G2 STEEL / O. M. Mishchiruk, A. I. Verameichyk, M. V. Neroda, B. G. Holodar // Vestnik of Brest State Technical University. 2022. – № 3 (132). – P. 69–74. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2023-132-3-69-74>.

2. Девойно, О. Г. Обеспечение ресурсных параметров ответственных элементов механических трансмиссий с использованием поверхностных слоев, формируемых лазерными технологиями [Электронный ресурс] / О. Г. Девойно, И. В. Швец // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-техн. сб. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: А. В. Чигарев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – Вып. 34. – С. 266–270.

3. Александров, В. Г. Справочник по авиационным материалам. / В. Г. Александров. - М. : Транспорт, 1972. - 328 с.

4. Амитан, Г. Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др. – Л. : Машиностроение, 1988. – 719 с.

5. Асатурян, В. И. Теория планирования эксперимента. /В. И. Асатурян. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.

Поступила в редколлегию 08.02.2024

УДК 621.78:535.211

В. С. Голубев¹, И. И. Вегера¹, В. Е. Ходюш¹, О. В. Дьяченко², К. В. Протасевич²¹Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь;²УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь

Тел.: +375 (029) 638-19-50, E-mail: gvs_fiti@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ HARDOX 600 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

Исследованы особенности поверхностного легирования стали Hardox 600 с использованием порошков В₄С, WС и Ni на основе воздействия излучением иттербиевого волоконного лазера. При мощности излучения ~ 2кВт качественные зоны легирования могут более устойчиво наблюдаться во всем исследуемом диапазоне скоростей сканирования лазерным лучом. С ростом глубины зоны легирования при использовании В₄С микротвердость снижается, что связывается со снижением концентрации вводимых легирующих элементов. Микротвердость слоя может варьироваться в диапазоне 7300 – 16000 МПа.

Ключевые слова: лазерное легирование, поверхностный слой, микроструктура, микротвердость

V. S. Golubev, I. I. Venera, V. E. Khodyush, O. V. Dyachenko, K. V. Protasevich**PECULIARITIES OF SURFACE ALLOYING OF HARDOX 600 STEEL USING A FIBER LASER**

The features of surface alloying of Hardox 600 steel using В₄С, WС, and Ni powders based on exposure to ytterbium fiber laser radiation are studied. At a radiation power of ~ 2 kW, high-quality doping zones can be observed more stably over the entire range of laser beam scanning speeds under study. With an increase in the depth of the alloying zone when using В₄С, the microhardness decreases, which is associated with a decrease in the concentration of introduced alloying elements. The microhardness of the layer can vary in the range of 7300 - 16000 MPa.

Keywords: laser alloying, surface layer, microstructure, microhardness

1. Введение

В настоящее время традиционные металлургические методы получения и термообработки многих сталей и сплавов практически исчерпали свои возможности в плане повышения физико-механических свойств. Рассчитывать на получение новых материалов с использованием стандартных технологий, которые могли бы значительно изменить положение в этих вопросах, не приходится. Именно поэтому, в последние несколько десятилетий для решения этой проблемы упор делается на развитие и применение новых, главным образом высокоэнергетических технологий получения материалов и инженерии поверхности, нанесения покрытий и др. [1-7].

Одним из видов этих методов поверхностного упрочнения является лазерное легирование рабочей поверхности через жидкую фазу за счет нагрева до оплавления основного металла. При таком способе упрочнения поверхности, легирующие элементы, например, входят в состав предварительно наносимой обмазки, которая состоит из порошка требуемого химического состава и связующего вещества [7]. В данной статье приводятся результаты по лазерному легированию износостойкой стали марки Hardox 600.

2. Материалы и методики исследований

Образцы для исследования вырезались из листа стали марки Hardox 600 толщиной 10 мм. Исходная твердость стали составляла ~ 600 НВ. В качестве

легирующих материалов в данных экспериментах использовались порошки карбидов W_4C , WC и Ni .

Предварительно перед лазерной обработкой на поверхности формировали слой, нанося на нее обмазку из вышеуказанных порошков. Толщина слоя составляла $\sim 100 - 150$ мкм. Обработка образцов проводилась на базе модуля поверхностной локальной термообработки МЛ35–ПО, в котором используется иттербиевый волоконный лазер ЛС–2 с максимальной выходной мощностью 2 кВт. В качестве защитного газа использовался аргон.

3. Результаты исследований и обсуждение

В рамках данной работы проведено изучение геометрических размеров, структуры, микротвердости и качества поверхностных слоев. Поверхностное лазерное легирование в данном случае состоит в получении легированных слоев с предварительным расположением присадочных материалов непосредственно в зоне действия сфокусированного лазерного излучения. Образец с тонким слоем легирующей обмазки при сканировании лазерного луча локально оплавляется, легирующие компоненты попадают в объем жидкой ванны расплава, который затем кристаллизуется. На рисунке 1 показаны характерные микроструктуры получаемых в данных экспериментах слоев.

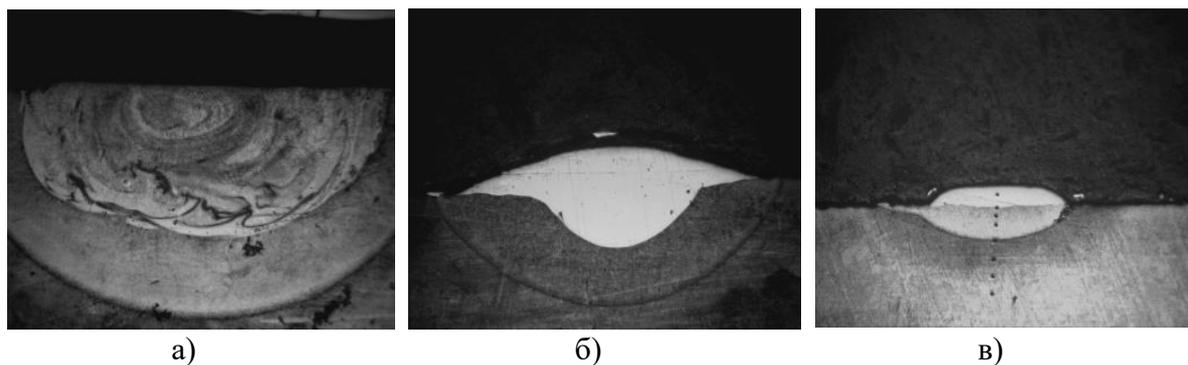


Рисунок 1. Микроструктура поверхностного слоя при использовании для легирования порошка WC (а) и Ni (б, в): а - $P=2$ кВт; $v=1$ м/мин; б - $P=1$ кВт; $v=1$ м/мин; в - $P=1$ кВт; $v=5$ м/мин.

Из рисунка 1 видно, что полной гомогенизации ванны расплава при использовании особенно химических соединений с высокой температурой плавления получить не удастся. Наблюдаются своеобразные вихри и «языки», имеющие различную степень травимости и, можно предположить, различный структурно-фазовый состав и концентрацию легирующих элементов. Это говорит о том, что при данных режимах времени существования ванны расплава и скорости его конвекции недостаточно для получения однородной структуры зоны оплавления.

Однородная структура характерна непосредственно для зон оплавления поверхностного слоя данной стали во всех режимах лазерной обработки, когда легирующий материал на поверхность не наносился. Тем не менее, такие режимы лазерного легирования с созданием гетерофазной структуры могут быть весьма перспективны для условий работы деталей при абразивном износе.

Максимальная глубина легированных слоев при мощности 1 кВт составляет ~ 350 мкм, при мощности 2 кВт – ~ 600 мкм, зона мартенситно-аустенитных превращений в твердой фазе при этом может достигать соответственно 200-250 и 300-350 мкм. В целом при увеличении плотности потока лазерного излучения возрастал объем расплавленного металла, то есть увеличивалась как глубина, так и ширина расплавленной дорожки, достигающей, например, при диаметре пятна фокусировки ~ 1,5 мм и мощности излучения 2 кВт максимальных значений ~ 2,5-3 мм.

Обращает на себя внимание факт наличия при использовании WC и V₄C достаточно ровной поверхности закристаллизовавшегося металла (рисунок 1 а), то есть малой конечной шероховатости поверхности, что может обеспечить при необходимости механической шлифовки достаточную глубину легированного слоя. Следует отметить, что при осуществлении процесса лазерного легирования, как правило, над поверхностью наблюдался светящийся факел, связанный с испарением легирующего материала и созданием паров отдачи.

Однако искривления поверхности в данном случае не наблюдается. Это говорит о том, что пары отдачи формируются только в первоначальный момент нагрева, когда расплавления материала основы еще не происходит. В противном случае наблюдался бы прогиб свободной границы расплава и ее фиксация при конечной кристаллизации. Именно в начальной стадии процесса легирования такой перегрев поверхности порошинок нанесенного материала будет более характерен для излучения с более короткими длинами волн. Напомним, что длина волны излучения волоконного лазера на порядок меньше длины волны, например, CO₂ – лазера. В связи с этим, снижается характерная глубина зоны непосредственного поглощения лазерного излучения легирующим материалом, в целом металлической поверхностью и возрастает коэффициент такого поглощения. Это в свою очередь ведет к ускорению перегрева поверхности порошинок легирующего материала, испарению и образованию факела.

Измерения микротвердости по глубине обработанных слоев показали следующее. В зоне расплава стали Hardox 600 без нанесения легирующей обмазки при различных параметрах лазерной обработки в целом дополнительного упрочнения не наблюдалось, значения микротвердости во всем диапазоне режимов варьировались в пределах 4200 – 6200 МПа, небольшое упрочнение наблюдалось в зоне закалки из твердой фазы (6200 – 7000 МПа).

В зоне отпуска микротвердость снижалась до уровня 3750 – 4200 МПа. Как отмечалось производителями данной стали, ее состав и режим термообработки позволяют создать для нее универсальный комплекс свойств, дополнительный нагрев приводит в большинстве случаев к его ухудшению. Это наблюдается и при лазерном воздействии. В частности, в режимах расплавления происходит, по-видимому, дополнительно фиксация остаточного аустенита, что снижает твердость материала.

В зоне отпуска проходят стандартные процессы превращения мартенсита в промежуточные структуры. Значительное падение микротвердости непосредственно у поверхности ($P = 1$ кВт; $v = 5$ м/мин) помимо прочего может еще обуславливаться обезуглероживанием и выгоранием других исходных легирующих элементов стали в процессе прокатки и термообработки полуфабрикатов.

Непосредственно уже проведением самого процесса лазерного легирования удается варьировать теми или иными свойствами поверхностных слоев.

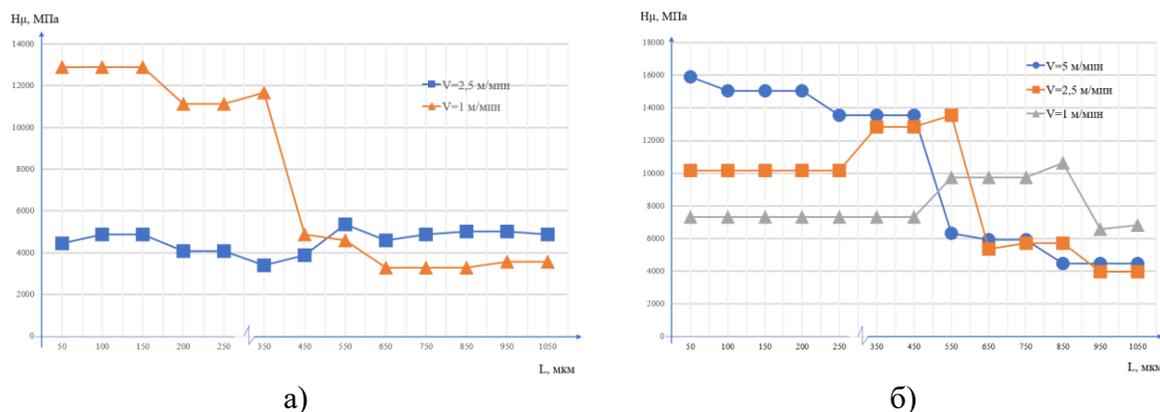


Рисунок 2. Зависимость микротвердости по глубине слоя при лазерном легировании поверхности стали Hardox 600 с использованием V_4C : а - $P = 1 \text{ кВт}$; б - $P = 2 \text{ кВт}$

Из рисунка 2 видно, что процесс легирования критичен к режимам лазерного воздействия. Так при мощности 1 кВт (рисунок 2 а) повышение твердости поверхностного слоя фиксируется при минимальной скорости 1 м/мин. В то же время при более высокой мощности $P = 2 \text{ кВт}$ (рисунок 2 б) зоны легирования с повышенной твердостью устойчиво наблюдаются во всем исследуемом диапазоне скоростей сканирования лазерным лучом. Причем с ростом глубины зоны легирования микротвердость снижается, что, по-видимому, можно связать со снижением концентрации вводимых легирующих элементов. Микротвердость слоя уже может варьироваться в диапазоне 7300 – 16000 МПа. При этом обращает на себя внимание факт более пологого поведения зависимости микротвердости по глубине поверхностного слоя в зоне отпуска при легировании порошком V_4C (рисунок 2 а) по сравнению с режимом обработки с расплавлением поверхности, но без внесения легирующего материала. При этом увеличивается и размер этой зоны.

Более своеобразная картина складывается при использовании в качестве легирующего материала порошка WC и Ni . Также, как и ранее при легировании стали 5ХНМ с применением CO_2 – лазера [1] значительного упрочнения при использовании WC нами не наблюдалось, хотя не наблюдалось и никакого порообразования. В случае с Ni наоборот наблюдалось разупрочнение легированного слоя. Тогда как на стали 5ХНМ при легировании этим элементом микротвердость в легированном слое возрастала до 7400 – 10000 МПа, а теплостойкость слоя по уровню 60 HRC достигала 550°C . Из рисунка 1 б видно, что свободная поверхность закристаллизовавшегося металла является выпуклой. Как и при легировании в случае использования V_4C влияния давления паров отдачи здесь видимо также не проявлялось, а вот влияние сил поверхностного натяжения проявилось. Именно действием значительных сил поверхностного натяжения можно объяснить стягивание расплава к центру лазерной дорожки с формированием при кристаллизации выпуклости. При этом со снижением плотности мощности лазерного излучения процесс легирования постепенно трансформируется в процесс лазерной наплавки (рисунок 1 в). При этом создаваемые слои с увеличением концентрации Ni в ванне расплава постепенно начинают проявлять все более высокую коррозионную стойкость. Такая картина, когда использовался Ni в качестве легирующего материала для стали Hardox 600, может быть связана со следующими факторами. Данная сталь близка по химическому составу с близкими значениями по концентрации со сталью 5ХНМ. Однако, сталь Hardox 600 является

борсодержащей сталью, правда концентрация бора весьма незначительна ($\leq 0,005\%$). Тем не менее, именно введение бора в таких незначительных концентрациях существенно влияет на поведение расплава при кристаллизации, что приводит к измельчению зеренной структуры. Вполне вероятно, этот фактор может оказаться важным по своему влиянию на коэффициенты смачиваемости расплавов, степень их перемешивания, суммарную величину сил поверхностного натяжения.

4. Заключение

Проведено изучение влияния ряда энергетических и технологических факторов на особенности поверхностного легирования износостойкой стали Hardox 600 на основе воздействия излучением иттербиевого волоконного лазера. В качестве легирующих материалов использовались порошки карбидов W_4C , WC и Ni . Режимы лазерной обработки подбирались в зависимости от плотности мощности лазерного излучения установки, линейных скоростей перемещения луча и диаметра лазерного пятна. Изучены геометрические размеры, структура и качество поверхностных слоев, создаваемых в результате лазерного воздействия. Показано, что процесс легирования критичен к режимам лазерного воздействия. Глубина легированных слоев при мощности 1 кВт составляет ~ 350 мкм, при мощности 2 кВт – ~ 600 мкм, зона мартенситно-аустенитных превращений в твердой фазе при этом может достигать соответственно 200-250 и 300-350 мкм. В целом при увеличении плотности потока лазерного излучения возрастал объем расплавленного металла, то есть увеличивалась как глубина, так и ширина расплавленной дорожки, достигающей, например, при диаметре пятна фокусировки $\sim 1,5$ мм и мощности излучения 2 кВт максимальных значений $\sim 2,5$ -3 мм. Обращает на себя внимание факт наличия при использовании WC и W_4C достаточно ровной поверхности закристаллизовавшегося металла, то есть малой конечной шероховатости поверхности, что может обеспечить при необходимости механической шлифовки достаточную глубину легированного слоя.

Отмечено, что для карбида W_4C при мощности 1 кВт повышение твердости поверхностного слоя фиксируется при минимальной скорости 1 м/мин. В то же время при более высокой мощности $P = 2$ кВт зоны легирования с повышенной твердостью устойчиво наблюдаются во всем исследуемом диапазоне скоростей сканирования лазерным лучом. Причем с ростом глубины зоны легирования микротвердость снижается, что, по-видимому, можно связать со снижением концентрации вводимых легирующих элементов. Микротвердость слоя может варьироваться в диапазоне 7300 – 16000 МПа.

Более своеобразная картина складывается при использовании в качестве легирующего материала порошка WC и Ni . Также, как и ранее при легировании стали 5XHM с применением CO_2 – лазера значительного упрочнения при использовании WC не наблюдалось. В случае с Ni наоборот наблюдалось разупрочнение легированного слоя. При этом со снижением плотности мощности лазерного излучения процесс легирования постепенно трансформируется в процесс лазерной наплавки. При этом создаваемые слои с увеличением концентрации Ni в ванне расплава постепенно начинают проявлять все более высокую коррозионную стойкость.

Проведено также изучение процесса легирования данной стали при более узкой фокусировке излучения, что способствовало повышению плотности мощности лазерного луча. Диаметр пятна фокусировки лазерного излучения в данном случае составлял $\sim 0,5$ мм. Зафиксировано, что зона расплава вытягивалась в виде «мыска» по направлению распространения лазерного луча, то есть начинала формироваться

начальная стадия режима «кинжального» проплавления. При этом для обоих карбидов наблюдаются зоны упрочнения, например, выше 6000 МПа для WC до глубины 13680 мкм, для W₄C – до 680 мкм. Микротвердость в приповерхностном слое может достигать 8000 – 12000 МПа и 16000 МПа соответственно, что значительно выше чем для таких же стандартных режимов легирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Астапчик С. А., Голубев В. С., Новикова О. В., Процкевич Л. И., Чеботько И. С. Лазерное легирование сталей с использованием порошковых материалов./ Весті АН БССР, сер. фізика-тэхнічных навук. – 1989, №4. – С.7-13.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 252 с.
4. Астапчик, С. А. Лазерные технологии: возможности и перспективы обработки деталей и инструмента / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков // Тяжелое машиностроение. – 2004, № 2. – С. 33–37.
5. Девойно, О. Г. Технология формирования износостойких поверхностей лазерным легированием / О. Г. Девойно. – Минск: Технопринт, 2001. – 180 с.
6. Бернацкий, А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий // Автоматическая сварка. – 2013, №. 12. – С. 3 – 10.
7. В. С. Голубев, И. И. Вегера, О. Чернашеюс, В. В. Чаевский. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя. / Вестник БарГУ, сер. Технические науки – 2019, Т.7. – С.34-42

Поступила в редакцию 05.02.2024

Е. С. Киселёв, д.т.н., профессор, **К. С. Жирухин**, аспирант
(Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия)
Тел. +7 937 457 71 04; E-mail: kirill.zhirukhin@haltec.ru)

ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОСМЕННЫХ ПАЛЕТНЫХ СИСТЕМ НУЛЕВОГО БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье описаны преимущества быстросменных палетных систем нулевого базирования и эффективность их использования в технологических процессах. Использование быстросменных палет рассмотрено как эффективный способ сокращения продолжительности вспомогательных переходов установки и переустановки заготовок деталей. Приведены основные конструктивные решения, обеспечивающие точность и жесткость крепления элементов системы (оснастки) на станке.

Ключевые слова: система нулевого базирования, традиционные зажимные приспособления, подготовительно-заключительное время, зажим заготовки.

E. S. Kiselev, K. S. Zhirukhin

APPLICATION OF QUICK-CHANGE ZERO-BASED PALET SYSTEMS TO INCREASE THE PRODUCTIVITY OF RUSSIA ENTERPRISES

The article describes the advantages of quick-change zero-based pallet systems and the effectiveness of their use in technological processes. The article presents the system of quick-change pallets as an effective way to reduce the duration of auxiliary operations to install and reinstall parts. It shows the basic design solutions, providing the accuracy and rigidity of the mounting of the system (snap) on the machine.

Keywords: zero-based system, traditional clamping fixtures, preparatory and final time, workpiece clamping.

1. Введение

Сохранение положительной тенденции по увеличению объёмов машиностроительного производства продукции, – основная цель, стоящая перед российской промышленностью на сегодняшний день и в ближайшем будущем. В период пиковой загрузки производства как никогда важно повысить эффективность работы существующего на предприятиях оборудования, увеличить производительность и сократить простои. Стратегия наращивания производственных мощностей только за счёт закупки нового оборудования не является панацеей из-за усложнившейся ситуации с недостаточным количеством отечественных и импортом современных обрабатывающих центров ведущих мировых производителей станкостроения, а также дефицита квалифицированных кадров для их рациональной эксплуатации. Влияние возросших простоев оборудования, вызванных проблемами с поставками запасных частей или вовсе их недоступностью на рынке, также трудно переоценить

Таким образом, необходимо максимально повысить эффективность использования уже имеющихся мощностей. Помимо сокращения различных видов производственных потерь в дискретных механообрабатывающих производствах следует первоочередное внимание уделять уменьшению машинно-автоматизированного и подготовительно-заключительного времени. В последние десятилетия тенденция сокращения данных показателей является приоритетной в металлообработке. Мировые и отечественные производители непрерывно разрабатывают всё новые конструкции режущего инструмента (как корпусного, так и цельного твердосплавного), а также составы и технологии нанесения износостойких покрытий, способные работать на более высоких режимах резания. Одновременно инженеринговые компании внедряют

все новые методы и стратегии механической обработки, оптимизируя традиционные технологии и управляющие программы.

Вторым по порядку, но не по значимости, параметром, влияющим на производительность, является сокращение подготовительно-заключительного времени, затрачиваемого на подготовку к выполнению сменного задания (подготовку инструментальных наладок, установку, выставление и привязку зажимной оснастки с заготовками на станке).

2. Основное содержание и результаты работы

Относительно недавно в мировой промышленности появились новые решения по сокращению времени на наладку инструмента, оснастки и заготовок. Условно их можно разделить на два направления. Первое, применительно к инструментальным наладкам, – это использование быстрозажимных гидравлических оправок и специализированных машин для настройки инструмента вне станка. Второе направление, применительно к заготовке и приспособлению, – использование быстросменных палетных систем нулевого базирования. В мировой практике применение быстросменных систем нулевого базирования явилось новой формой подготовки производства со снятием стружки с заготовки. Её сущность заключается в том, что стол каждого станка дополнительно оснащается данной системой. Быстросменная система нулевого базирования (например, система VERO-S Aviation) никогда с него не снимается, а все стандартные и специальные приспособления устанавливаются на стол станка исключительно через неё. К сожалению, как показывает практика, лишь небольшой процент российских механообрабатывающих производств осведомлён о существовании и преимуществах таких систем, и ещё меньший процент уже использует в существующих технологиях механической обработки. Данная статья посвящена обзору особенностей системы нулевого базирования, её преимуществ и недостатков.

Традиционно зажимные приспособления или непосредственно заготовки монтируются на стол станка с помощью прихватов и метизов (рисунки 1). В зависимости от сложности изготавливаемой детали, её габаритов количество переустановок и прихватов может варьироваться от одного до пяти и более раз. Для исключения прогиба и дополнительных деформаций достаточно часто приходится применять кустарные прокладки, подбор толщины и выставление которых также требует значительных временных затрат. Время, затрачиваемое на монтаж и демонтаж прихватов, их перестановку может занимать от 50 до 80 % от подготовительно-заключительного времени и до 40% от общего штучно-калькуляционного времени изготовления детали. Кроме того, в случае изготовления тонкостенных нежестких деталей возникает риск коробления изготавливаемой детали из-за неравномерной нагрузки от прихватов и перераспределением технологических остаточных напряжений (ТОН) между переходами и операциями. Процесс закрепления заготовок данным методом сопровождается возникновением сопутствующих временных потерь на выставление приспособления или изготавливаемой детали относительно системы координат станка с использованием индикаторов часового типа или контактных щупов, установленные в шпинделе станка. При таком методе крепления в ряде случаев жёсткость изготавливаемой детали бывает недостаточной, что влечёт за собой снижение качества изделия или занижение режимов резания, о необходимости повышения которых упоминалось выше.

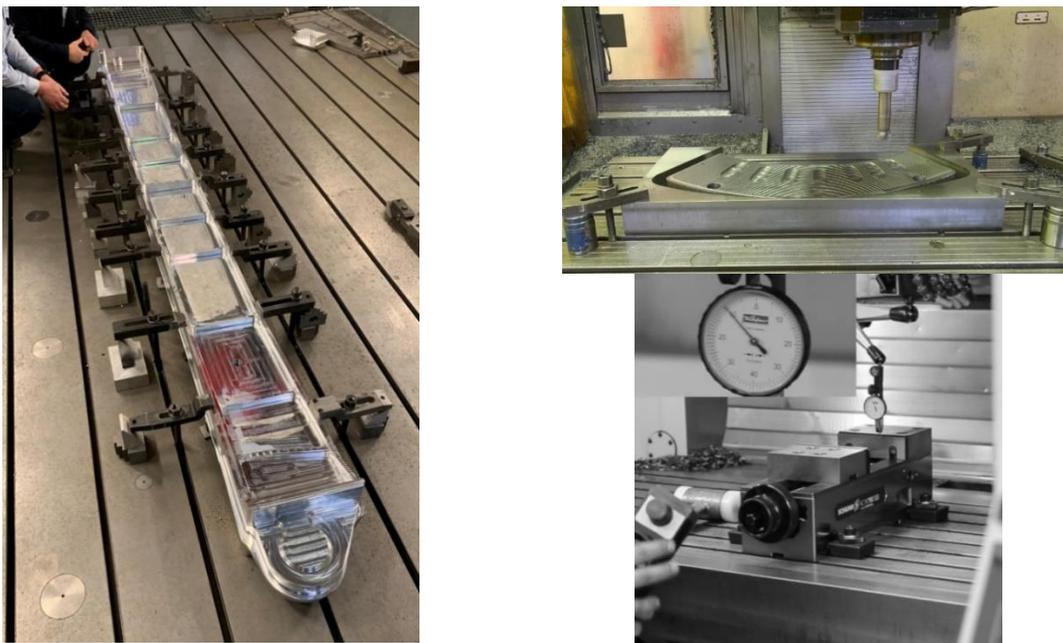


Рисунок 1. Традиционный вид крепления заготовок и приспособлений различной сложности и типов на станках фрезерной - расточной группы

Современные мировые достижения научно-технического прогресса предлагают использование быстросменных палетных систем нулевого базирования [1]. Реализация установки и зажима при этом способе выглядят следующим образом:

1. На стол станка устанавливается базовая станция системы, оснащённая гнездами (модулями) для зажимных элементов. Размеры и конфигурация станции могут варьироваться от стандартных решений до специализированных, закрывающих весь стол станка. На рисунок 2 представлена станция с шестью зажимными элементами, закрывающая собой 95% площади стола станка. В данном примере зажимные модули располагаются по сетке 200x200 мм (межосевое расстояние), высота подъёма заготовки относительно стола станка 60мм (высота станции).

2. В приспособление, в оснастку или даже в заготовку монтируются зажимные пальцы различным способом крепления. На рисунок 3 изображено три типа зажимных пальцев. Первые два варианта с помощью винтового соединения (сквозное и одностороннее крепление винтом или шпилькой М12 и М10 соответственно). Последний вариант с типом крепления «ласточкин хвост» - за счёт двух подвижных элементов.

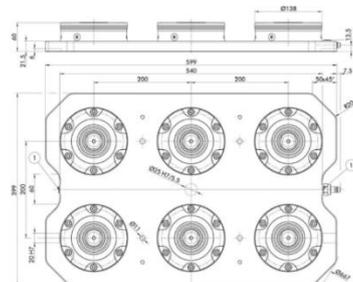


Рисунок 2. Шестимодульная станция нулевого базирования



Рисунок 3. Зажимные пальцы системы нулевого базирования

Сам зажимной элемент (модуль) станции в зависимости от производителя может иметь разную конструкцию, но в большинстве случаев представляет собой самоблокирующийся механизм (см. рис. 4), фиксирующий зажимной палец [2].



Рисунок 4. Механизм зажима пальцев нулевого базирования

Перед монтажом приспособления, оснастки или заготовки, оснащённой зажимными пальцами, производится подвод сжатого воздуха к станции нулевого базирования для разжима зажимных модулей. Далее производится установка на станцию приспособления, оснастки или заготовки, после чего подвод сжатого воздуха убирается и происходит зажим (под действием пружин) пальцев. Таким образом, воздух необходим лишь для открытия модулей, разжима и извлечения установленного элемента на станции нулевого базирования.

Производители высококачественных быстросменных палетных систем нулевого базирования гарантируют обеспечение принципа базирования высокой степени

Основные преимущества, которыми обладает быстросменная палетная система нулевого базирования:

- за счёт конструкции системы – сокращается время смены приспособлений или заготовок (от десятков секунд до пары минут). По сравнению с традиционными методами сокращение временных затрат на переналадку в 2-3 раза;

- за счёт принципа нулевого базирования – отсутствуют временные затраты на выставление заготовки и привязки к системе координат станка;

- высокое втягивающее (до 28 кН) и удерживающее усилия (до 75 кН) гарантируют надёжное и максимально жёсткое закрепление, что позволяет увеличивать режимы резания без ущерба качеству изготавливаемой детали;

- универсальность системы – может применяться на всех типах оборудования, реализовывая концепцию палет-спутников для быстрого и точного перемещения между различными единицами оборудования;

- высокая гибкость системы – возможно закрепление любого типа заготовок методом прямого закрепления, а также стандартных и специальных зажимных приспособлений.

- высокий ресурс и ремонтпригодность системы. Ведущие мировые производители гарантируют не менее 1000000 циклов зажима или 12-15 лет бесперебойной работы.

Эволюцией палетных систем нулевого базирования являются системы нулевого базирования прямого закрепления сложных заготовок с компенсацией поворотов и деформаций, возникающих в заготовке при обработке [3, 4]. В данном виде систем нулевого базирования ряд точек крепления заготовки детали имеют способность «дышать», двигаться, когда это требуется для уменьшения деформаций заготовки при ее закреплении.

При этом происходит подстраивание оснастки под деформируемые поверхности заготовки при снятии напряжений, при ее раскреплении. Новая разновидность системы позволяет осуществлять высокопроизводительную механическую обработку, нивелируя деформации, вызываемые технологическими остаточными напряжениями в заготовке. Применяя систему нулевого базирования, можно частично или полностью исключить необходимость операции стабилизации, которым подвергают нежёсткие тонкостенные заготовки из алюминия.

Ведущая российская инжиниринговая компания ООО «ХАЛТЕК-ДоАЛЛ» (г. Ульяновск) доказала на практике возможность полного исключения операций стабилизации при изготовлении одной из авиационных деталей типа «шпангоут», что позволило сократить производственный цикл более чем в 2 раза [5]. Сравнение показателей норм времени представлено на рисунок 7.

Таким образом, сокращая время простоя станка при переналадках путем подготовки наладки вне станка и последующей смены приспособлений за секунды, происходит кратное сокращение затрат и увеличение производительности. Ниже представлен график сравнения затрат на переналадку с применением традиционных способов и быстросменных палетных систем.

Даже при количестве переналадок до 1 шт. в смену быстросменные системы нулевого базирования способныкратно сократить затраты (для объективности картины на момент написания статьи затраты представлены в валюте) традиционных способов и быстросменных палетных систем (рисунок 8).

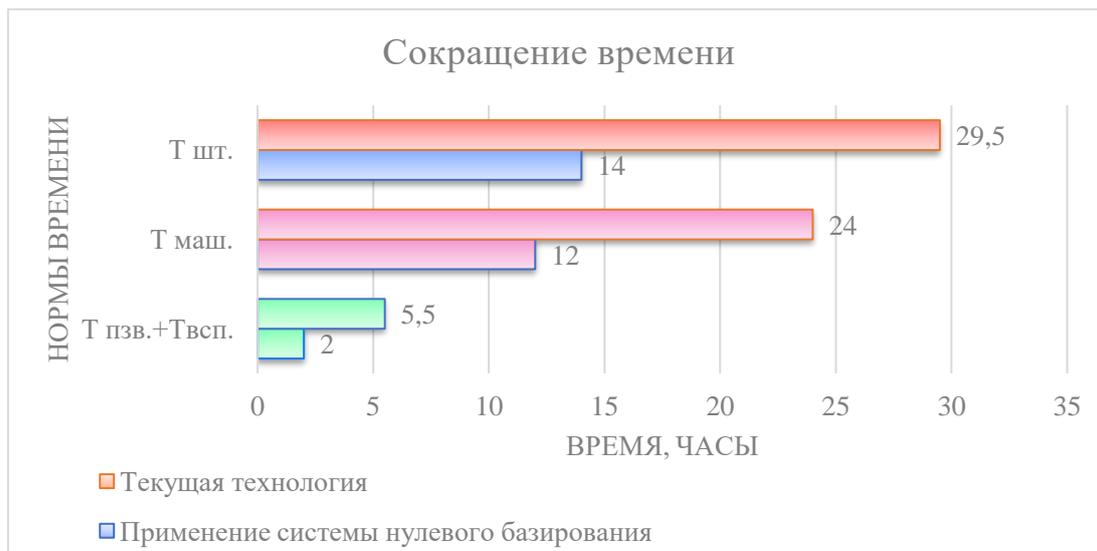


Рисунок 7. Сокращение цикла производства изделия с применением быстросменной системы нулевого базирования

3. Заключение

На сегодняшний день проблема трудозатрат на переналадки и подготовку производства недооценена на отечественных предприятиях. Быстросменные палетные системы нулевого базирования имеют огромный потенциал в части кратного сокращения времени на переналадку и снижения времени простоя станка. Безусловно, такие системы должны обладать высоким ресурсом и надёжностью, инвестиции в которые окупятся в течении нескольких месяцев.

Технологии с применением быстросменных систем нулевого базирования доказывают свою эффективность не только в сокращении временных затрат на производство конструктивно сложных деталей, но и обеспечивают высокую жёсткость технологической системы, возможность полноценной пятиосевой обработки. Все это позволяет существенно увеличить режимы резания, уменьшить себестоимость, изготавливаемой детали и повысить рентабельность действующего производства.



Рисунок 8. Сравнение затрат при традиционной переналадке и с применением быстросменных систем нулевого базирования

Современная зажимная оснастка – быстросменные системы нулевого базирования позволяют снизить издержки производства за счёт уменьшения машинного и подготовительно-заключительного времени, исключения дополнительных и затратных операции стабилизации, что скажется на существенном снижении себестоимости конечного продукта в целом и на увеличении его конкурентоспособности.

Быстросменные системы нулевого базирования применяются не только при мелкосерийном и единичном производстве. В промышленно-развитых странах запада и Азии они все чаще используются при крупносерийном и массовом поточном производстве. Последнее позволяет снизить затраты при смене номенклатуры выпускаемой продукции. Такие системы все чаще становятся неотъемлемой составляющей роботизированных комплексов при безлюдном производстве. В настоящее время ряд отечественных предприятий уже успешно используют данную оснастку, ещё часть находится на заре внедрения и применения данных систем. В сегодняшних реалиях необходимо максимально распространить данную концепцию по всем предприятиям страны, что, несомненно, позволит вывести российскую промышленность на мировой уровень.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Factories of the Future* / T. Tolio et al. (eds.). – Milan, Italy: Dipartimento di Meccanica Politecnico di Milano. 2019. – 494 с. – ISBN 978-3-319-94357-2.

Кротов С. Системы быстрого базирования и предъявляемые к ним требования на примере SCHUNK VERO-S /С. Кротов // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. – 2016. – №4. – С. 70-74.

2. Kiselev E. S. High-tech technology for increasing the efficiency of manufacturing nonrigid parts from titanium and aluminum alloys / E. S. Kiselev, M. V. Nazarov. // *Hightech technology in machinery*. – 2020. – №7 (109). – pages. 12-19.

3. Добротворский, С. С. Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем /С. С. Добротворский, М. И. Гасанов, Е. В. Басова. // *Вісник ХПІ*. – 2015. – №4 (1113). –С.37-40.

4. Khramov A., Application of the Modern Stationary Work holding Systems for Increase Capacity and Quality of Non-Rigid Aircraft Parts/Khramov A., Semdyankin I.,

5. Kiselev E. // *Matec web of Conferences* 346. – 2021. – 03076 (2021) ICMTMTE, <https://doi.org/10.1051/matec conf/2021 34 603076>.

Поступила в редколлегию 08.02.2024

Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б., Котляров Б. С.

(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, Россия)

Тел: +7 (988) 554-00-21; +7 (985) 021-79-06, +7 (964) 704-53-62;

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

ВЫБОР БАЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ БЛОК-ВАЛА КОЛЕС В СБОРОЧНОМ ВАРИАНТЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В данной статье рассмотрен вопрос выбора технологически баз при обработке входящих в сборочную единицу блок-вал колес деталей, обеспечивающих требуемое взаимное положение поверхностей для сборки. При этом технологические базы деталей в процессе формообразования при механообработке не всегда совпадают с конструктивными базами, обеспечивающими правильность сборки сборочной единицы - блок-вала колес. Рассмотрены специфические вопросы выбора баз для обеспечения точности сборки с учетом необходимости одновременной ориентации нескольких деталей относительно выбранной конструктивной базы основной детали узла.

Ключевые слова: деталь, участок, базовая поверхность, ориентация, относительное положение, фиксация, точность.

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

SELECTION OF BASES FOR MACHINING AND ASSEMBLY OF WHEEL BLOCK-SHAFT PARTS IN THE ASSEMBLY VERSION OF PRODUCTION

This article considers the issue of choosing technological bases for processing parts included in the assembly unit block shaft of wheels, providing the required relative position of the surfaces for assembly. At the same time, the technological bases of the parts in the process of forming during machining do not always coincide with the structural bases that ensure the correct assembly of the assembly unit - the block shaft of the wheels. The specific issues of choosing bases to ensure the accuracy of the assembly are considered, taking into account the need for simultaneous orientation of several parts relative to the selected structural base of the main part of the node.

Keywords: part, section, base surface, orientation, relative position, fixation, accuracy.

1. Введение

Одним из способов создания аналогов деталей со сложной геометрией является замещение цельноизготовленных деталей сборными конструкциями из деталей с более простыми и технологичными формами и поверхностями.

Так для детали блок-вал колес, применяемой в КПП без разрыва ППМ, разработан вариант сборной конструкции блок-вала колес, состоящий из собственно вала, комплекта зубчатых колес, шпонок и вспомогательных фиксирующих деталей. Примеры эскизов цельного блок-вала и варианта сборочной единицы приведены на рисунке 1.

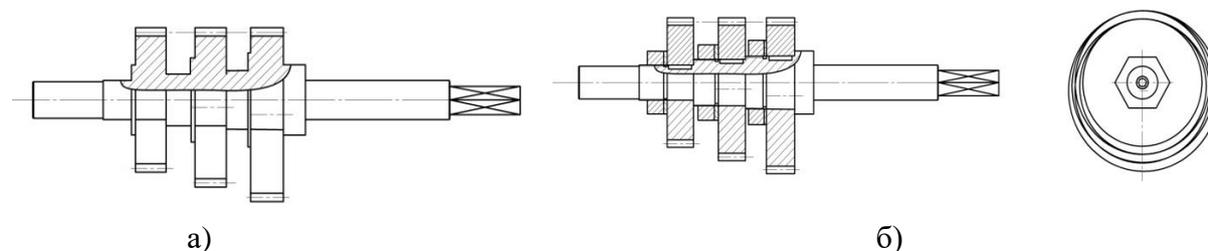


Рисунок 1. Варианты конструктивного исполнения блок-вала колес.

а) Блок-вал изготовлен как одна деталь; б) Блок-вал изготовлен как сборочная единица

2. Цель и задачи

Целью работы является проведение исследований по созданию порядка и разработке алгоритма действий при установке базовых поверхностей для проведения обработки деталей, входящих в сборочную единицу со множественными элементами и поверхностями, повторяющихся в нескольких частях и зонах конструкции. Исследования проведены на примере разработки технологии изготовления блок-вала колес КПП без разрыва ППМ, являющегося представителем конструкции таких конструкций. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд следующих задач:

1. Подтвердить актуальность ограниченной номенклатуры специфических узлов, к категории которых относится блок-вал КПП без разрыва ППМ, выполненных в сборочном исполнении вместо монолитных изделий, с целью снижения затрат и упрощения технологического обеспечения;
2. Установить предпочтительные базовые элементы и поверхности входящих в узел деталей, обеспечивающих удовлетворительную точность сборочного узла, не уступающую точности монолитного изделия, указанную в КД;
3. Предложить порядок расчета полей допусков на размеры и допускаемых отклонений относительного положения элементов, определяющих точность сборки узла;
4. Установить характер влияния точности сборочного узла блок-вала колес на точность механизма с учетом точности сопряжения блок-вала колес с корпусными деталями и другими деталями типа планшайб и кулачковых механизмов управления работой КПП без разрыва ППМ.

3. Основное содержание

Существует большое количество деталей машиностроительной сферы, имеющих множество присоединительных размеров для входящих в сборочную единицу деталей. В зависимости от функционального предназначения поверхностей необходимо в процессе обработки обеспечивать определенную степень точности относительного расположения поверхностей в пространстве. С целью достижения требуемой точности сборки необходимо обеспечивать достаточную степень точности изготовления деталей, в частности, точности выдерживания размерных цепочек в пределах заданных полей допусков, а также точности формы и взаимного расположения присоединительных поверхностей и отдельных специфических и множественных элементов деталей.

Порядок изготовления таких изделий рассмотрен на примере исполнения блок-вала колес КПП без разрыва ППМ [1, 2, 3], который для упрощения технологического обеспечения выполняется в варианте сборочной единицы.

На рисунке 2 приведен эскиз одного из вариантов исполнения блок-вала колес в виде сборочной единицы. В приведенном варианте сам вал исполнен как эксцентриковый вал, а зубчатые колеса – в виде симметричных колес. Эксцентриситет посадочных отверстий вала рассчитывается из величины эксцентриситета блок-вала в зацеплении, при котором обеспечивается правильное зубчатое зацепление при переключении передач.

Основные детали вышеприведенной сборочной единицы блок-вала колес приведены на рисунках ниже. На рисунке 3 приведен эскиз эксцентрикового вала, а на рисунке 4 групповой эскиз зубчатых колес с разным числом зубьев и посадочных диаметров на валу. Шаг размещения зубчатых колес вдоль оси вала обеспечивается

тем, что конструктивно выполнены упорные элементы с жестким допуском на размер и на относительное положение элементов.

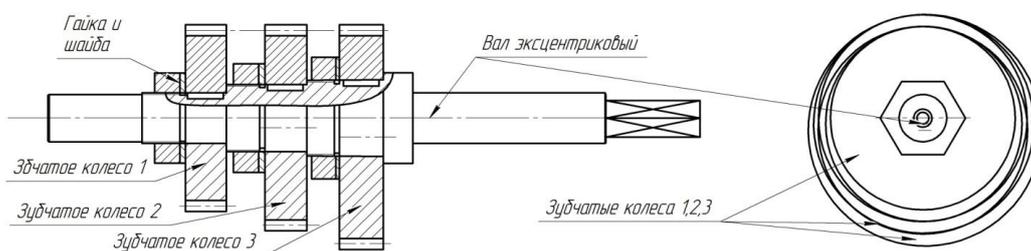


Рисунок 2. Эскиз блок-вала колес в исполнении сборочной единицы

Прижим к упорным поверхностям по оси обеспечивается крепежными деталями – гайками с шайбами. Привязка осевых размеров осуществляется по базовой опорной торцевой поверхности для крайнего зубчатого колеса.

Основной конструктивной и технологической базой для поверхностей вращения вала является ось центровых отверстий – база А на рисунке 3. Опорной конструктивной и измерительной базой для исполнения поверхностей и размещения зубчатых колес на валу в осевом направлении является опорная торцевая поверхность вала – база С. Возможно применение дополнительной технологической базы для сборки в виде боковой поверхности шпоночных пазов – база Б, имеющей привязку к базе А.

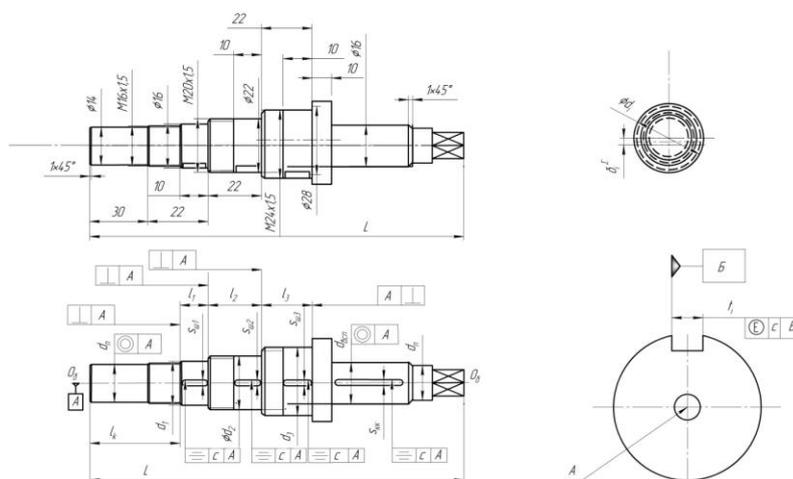


Рисунок 3. Эскиз вала с обозначением технологических баз для механообработки

Посадочные диаметры d_1 , d_2 и d_3 вала предназначены для установки зубчатых колес и выполняются по 6-7 квалитету точности с обеспечением требований по отклонению от цилиндричности и по величине отклонения от общей плоскости симметрии относительно боковых поверхностей шпоночных пазов для зубчатых колес. Дополнительно необходимо выдержать требование к отклонению от общей оси вращения.

Требования к относительным величинам отклонений поверхностей и элементов от номинального положения могут быть рассчитаны, исходя из допустимого отклонения параметров зацепления передач. Исходной величиной для разработки порядка расчета допусковых отклонений для вала и зубчатых колес блок-вала

предлагаемой КПП без разрыва ППМ является норма точности согласно ГОСТ 1643-81 и боковые зазоры T_{jn} в соответствии с принятой нормой кинематической точности рассматриваемой передачи, где учитывается вид сопряжения и степень точности изготовления зубчатых колес. Эскиз зубчатых колес для рассматриваемого блок-вала колес приведен на рис. 4.

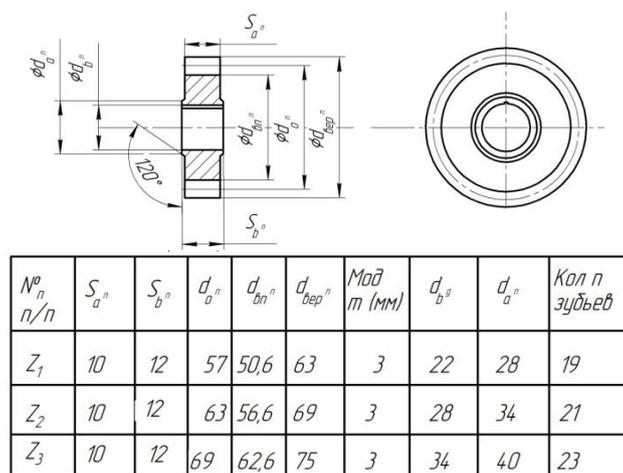


Рисунок 4. Эскиз групповой зубчатых колес, входящих в состав блок-вала колес.

Зубчатые колеса с разными размерами соответствуют трем передачам для КПП без разрыва ППМ, реализующих переключение и работу КПП в 3 скоростных режимах.

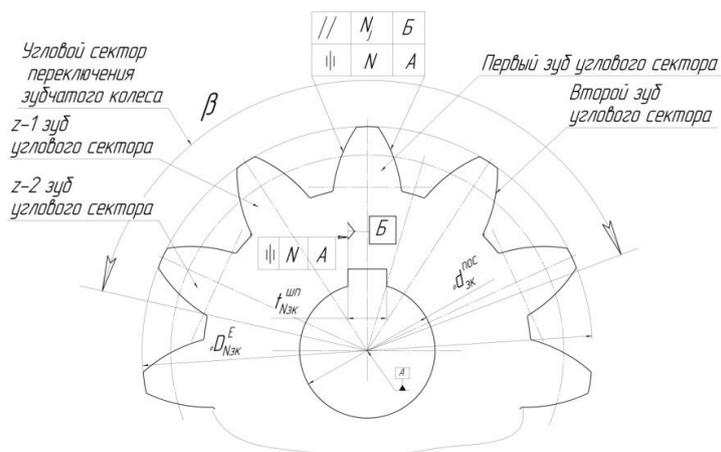


Рисунок 5. Эскиз зубчатого колеса с указанием принципиальных требований относительного положения элементов и баз основных и вспомогательных

Основная база поверхностей вращения зубчатого колеса А – ось посадочного отверстия $d_{зк}^{noc}$; вспомогательная база Б – боковые поверхности шпоночного паза $t_{Nзк}^{ig}$. Ограничено отклонение от симметричности шпоночного паза относительно оси А.

Поле допуска T_{jn} согласно ГОСТ 1643 [4] должно компенсировать все погрешности кинематических ошибок зацепления сопрягаемых звеньев $T_{сз}^{кин}$, а также погрешностей технологического обеспечения $T_{изгД}^{ТО}$ при изготовлении, а также

конструктивные допускаемые погрешности $T_{КД}^{констр}$, заложенные в конструкторской документации. Таким образом, можно записать соотношение:

$$T_{jn} \leq T_{сз}^{кин} + T_{иззД}^{ТО} + T_{КД}^{констр}. \quad (1)$$

Суммарная погрешность правой части выражения (1) не должна превышать допустимую величину погрешности T_{jn} по ГОСТ 1643. В рамках исследования данной работы необходимо выделить для дальнейшего рассмотрения часть погрешности $T_{иззД}^{ТО}$, которая характеризует ошибки относительно геометрической точности изделий, включающей размерные отклонения и отклонения формы и расположения элементов.

Оставляющими частями общей технологической погрешности являются связи и элементы системы технологического обеспечения цепочки СПИД (станок-приспособление – инструмент - деталь). Суммарная погрешность указанных частей и составляет полную технологическую часть общей ошибки изготовления, т.е.:

$$T_{иззД}^{ТО} = T_{ст}^{цз} + T_{пр}^{цб} + T_{ин}^{рчуст} + T_{дет}^{фпрпуск}, \quad (2)$$

где в правой части укрупненно представлены погрешности, присущие каждому звену цепочки СПИД. При этом каждый элемент правой части выражения (2) представляет собой сложную величину, включающую погрешности входящих частей.

Так погрешности станка $T_{ст}^{цз}$, указанные в выражении (2), отражают собственно точность изготовления самого станка согласно установленным нормам степеней точности. Сюда входят как ошибки выходных элементов – направляющих станины, соотношение характеристик точности расположения шпинделя относительно направляющих станины, а также точности характеристик осуществления перемещений и вращения механизмов подач и шпинделей станка.

Погрешность $T_{пр}^{цб}$ приспособления отражает степень точности изготовления оснастки и точности установки на станок при наладке технологической системы.

Погрешность $T_{ин}^{рчуст}$ инструмента определяется выбором характеристик применяемого инструментального обеспечения, характеризуемого степенью точности изготовления, материалом режущих кромок (твердость, износостойкость, перезаточки и т.д.), а также точность позиционирования на станке относительно определяющих поверхностей самого станка и приспособления.

Погрешность $T_{дет}^{фпрпуск}$ детали отражает свойства и их влияние на точность изготовления самой заготовки детали. Определяющими характеристиками здесь являются собственно применяемый материал заготовки с определенными физикомеханическими свойствами (твердость, вязкость, хрупкость, упругость, пластичность и др.), а также геометрия, форма и размеры элементов и величины припусков обрабатываемых поверхностей.

Каждый из рассмотренных элементов погрешностей подробно исследован, изучен, а результаты исследований изложены в технической литературе и учебниках [5].

Для решения задач настоящей работы интерес представляет та часть общей величины допускаемой погрешности, которая может быть использована в части компенсации ошибок при изготовлении блок-вала колес в пределах конструкторского

допуска с применением сборочного варианта исполнения. При этом существенная часть допуска может быть скомпенсирована правильным выбором и расчетом базирования при обработке поверхностей входящих в блок-вал деталей [6, 7, 8].

При установлении технологических баз для обработки вала на рис. 3 следует учитывать возможность обработки групп поверхностей с одной установки.

Так все поверхности вращения вала на рисунке 3 следует обрабатывать с одной установки в центрах – технологическая база А. Благодаря такому базированию при точении обеспечивается минимизация поля допуска и требования отклонений относительно общей оси центров вала. Максимальную погрешность в этом случае может составлять погрешность δ_i установки эксцентриситета ϵ_i осей каждой обрабатываемой посадочной поверхности вала относительно оси центров.

Аналогично все шпоночные пазы на посадочных поверхностях вала под зубчатые колеса и элемент управления следует также обрабатывать с одной установки и одним инструментом. В этом случае обеспечивается минимизация отклонения боковых поверхностей шпоночных пазов от общей прилегающей поверхности, что является важным условием позиционирования зубчатых колес по первому зубу углового сектора переключения передач в КПП. Чем меньше отклонение от конгруэнтности первого зуба всех зубчатых колес, тем более плавно осуществляется процесс переключения и перевод осей вращения зубчатых колес в новое ГМТ оси вращения блок-вала колес.

Примеры требований к отклонениям поверхностей зубьев зубчатых венцов приведены на рисунке 5 и к поверхностям вала в укрупненном плане на рисунке 3. Минимизация отклонений от требований, касающиеся поверхностей 1-го зуба углового сектора переключений и боковых поверхностей шпоночных пазов зубчатых колес обеспечивает максимальное совпадение контуров первого зуба всех колес в сборке блок-вала колес.

Необходимо учитывать то обстоятельство, что для контуров зубьев углового сектора переключения передач добавляется дополнительная величина погрешности в зацеплении, определяемая величиной модуля зацепления, общим количеством зубьев каждого зубчатого венца коле, а также количеством зубьев углового сектора, включенных в процесс собственно переключения передачи. Такое влияние в количественном плане можно отразить следующим выражением:

$$\delta_{шаг}^{\Sigma} = \delta_{зуб}^{констр} + \delta_{зуб}^{технолог} + \delta_{зац}^{кинемат} , \quad (3)$$

где $\delta_{зац}^{кинемат}$ - величина погрешности на шаг в (3), состоящая из суммарной накопленной погрешности в процессе переключения, зависящая от допускаемой погрешности зацепления, порядкового номера зуб в угловом секторе зубчатого венца, и числа зубьев, занятых в угловом секторе в процессе переключения передач.

Происхождение $\delta_{зуб}^{констр}$ - конструктивной, и $\delta_{зуб}^{технолог}$ - технологической составляющих частей суммарной погрешности $\delta_{шаг}^{\Sigma}$ углового шага, и влияющие факторы на величину ошибки рассмотрено ранее. Относительно величины погрешности $\delta_{зац}^{кинемат}$ необходимо добавить, что для каждого из входящих в зацепление зубьев угловых секторов колес на каждый последующий шаг зацепления, начиная от первого зуба добавляется величина $\delta_{чj}^{кин}$. При этом минимальное значение добавленной погрешности приходится на прилежащие к первому зубу угловой шаг 1-2 зубьев, и 1-

($n-1$) зубьев, где 1-й зуб – это центральный зуб углового сектора. Зубья 1 и ($n-1$) – это предстоящий перед первым зубом и последующий после 1-го зуба шаг колеса. Зависимость величины погрешности $\delta_{cj}^{кин}$ от указанных факторов можно записать в следующем виде:

$$\delta_{cj}^{кин} = \delta_{баз}^{кин} + \delta_{jn}^{доб}, \quad (4)$$

а величина:

$$\delta_{jn}^{доб} = \frac{n_j \times \delta_{баз}^{кин}}{2n}, \quad (5)$$

где в составе кинематической погрешности $\delta_{cj}^{кин}$ величина $\delta_{jn}^{доб}$ представляет дополнительную возможную погрешность от влияния составляющей при перемене оси вращения блок-вала в новом положении ГМТ:

n – число зубьев зубчатого венца, попадающих в угловой сектор переключения передач;

n_j – порядковый номер зуба углового сектора, начиная от центрального зуба №1, который в рассматриваемый момент находится в зацеплении с шестерней. В выражении (5) коэффициент 2 введен с учетом того, что первый зуб углового сектора – это центральный зуб, а в обе стороны от зуба № 1 симметрично расположены остальные зубья сектора. При этом фактически первым в начальную часть диапазона вращения в угловом секторе изменения положения осей вступает зуб, расположенный в начале углового сектора, затем зуб, предстоящий перед центральным, а потом центральный зуб. Замыкающими в зоне процесса переключения являются последующие два зуба - 2-ой и 3-ий зубья.

Для нормального зацепления толщина зуба определяется формулой $s = \pi \times m / 2$, где m - модуль зацепления. Для зацепления со смещением исходного контура при нарезании (положительных или отрицательных смещений зацеплений) необходимо проводить дополнительные расчеты с учетом величины смещения. Для косозубых зацеплений необходимо учитывать дополнительно угол наклона зубьев при нарезании зубчатых колес, оказывающих влияние на величину смещения исходного контура.

При применении зубчатых колес симметричного исполнения имеется возможность в процессе сборки блок-вала колес частично компенсировать погрешности изготовления в части отклонения от заданного относительного положения путем переустановки колес на 180° , что позволяет менять сторону отклонения от общей прилегающей плоскости. Другим моментом в повышении качества сборки всего механизма КПП является возможность исправления погрешностей изготовления зубчатых колес и посадок вала за счет корректировки линии контакта при перемещении пальца внутренней планшайбы по траектории паза внешней планшайбы в процессе переключения передач.

4. Заключение

В данной работе проведены исследования по созданию и разработке порядка действий при выборе базовых поверхностей для проведения обработки деталей, входящих в сборочную единицу блок-вал колес КПП без разрыва ППМ с элементами и поверхностями, повторяющимися в нескольких частях и зонах конструкции. Решен ряд следующих задач, обеспечивающих достижение поставленной цели:

1. Выявлены представители ограниченной номенклатуры специфических узлов, к категории которых относится блок-вал КПП без разрыва ППМ, выполненных в сборочном исполнении вместо монолитных изделий, с целью снижения затрат и упрощения технологического обеспечения;

2. Установлены предпочтительные базовые элементы и поверхности входящих в узел деталей, позволяющие достигать удовлетворительную точность сборочного узла для сборки КПП, не уступающую точности монолитного изделия согласно КД;

3. Предложен порядок расчета полей допусков на размеры и величин отклонения относительного положения элементов, определяющих точность сборки узла;

4. Установлен характер влияния точности сборочного узла блок-вала колес и его элементов в сборочном варианте исполнения. При этом предусмотрено влияние выбора баз на точность механизма КПП без разрыва ППМ и возможности применения дополнительных механизмов компенсации погрешностей с учетом точности сопряжения блок-вала колес с корпусными деталями и другими деталями типа планшайб и кулачковых механизмов управления работой КПП.

ЛИТЕРАТУРА:

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

2. Михайлов А. Н. Анализ деталей по функциональным признакам участков и зон согласно уровню и глубине технологического обеспечения целевой функции / Михайлов А. Н., Котляров Б. С., Котляров В. Б., Котляров С. Б. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных работ. – Донецк: ДонНТУ, 2022. – Вып. 1 (76). – С. 43-52. ISSN 2073-3216, (E) ISSN 2518-7120.

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

4. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Обозначение: ГОСТ 1643-81.ГОСТ 1643-81

5. А. Г. Суслов Основы технологии машиностроения. Учебник Изд. КноРус | 2016.

6. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.

7. Технологическая наследственность в машиностроении / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев и [др.] / Под ред. А. М. Дальского. – М.: МАИ, 2000. – 364 с.

8. Анурьев В. И. Справочник конструктора машиностроителя / В. И. Анурьев: в 3 т., Т. 2. – М.: Машиностроение, 1982. – 736 с.

Поступила в редколлегию 01.02.2024

УДК 621.45.0.002.2(0.75.8)

А. Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф., **Д. В. Огренич**, аспирант
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, РФ
Тел.: +79494104485; E-mail: dmitryogrenich@yandex.ru

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД

В статье представлены данные о неравномерном характере износа лопаток. Рассмотрены разные методы для наплавления, создан алгоритм, который учитывает величину износа и помогает выбрать метод реализации ремонта. Выполнен анализ влияющих факторов на выносливость рабочих поверхностей лопаток. Рассмотрены основные особенности отделочно-упрочняющей обработки.

Ключевые слова: лопатка, остаточные напряжения, выносливость, наплавление лопаток, ремонт и восстановление рабочих поверхностей лопаток.

A. N. Mikhaylov, D. V. Ogrenich

MAIN FEATURES OF THE SYNTHESIS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS FOR REPAIR AND RESTORATION OF GTE COMPRESSOR BLADES

The article presents data on the uneven nature of blade wear. Various methods for surfacing are considered, an algorithm is created that takes into account the amount of wear and helps to choose a repair method. An analysis of the influencing factors on the endurance of the working surfaces of the blades was carried out. The main features of finishing and strengthening treatment are considered.

Key words: blade, residual stresses, endurance, fusion of blades, repair and restoration of blade working surfaces.

1. Введение

Ремонт и восстановления лопаток в последние годы является довольно перспективным направлением, в связи с тем, что в мировом масштабе идет тренд на экономное производство и как можно большем продлении ресурса работы, при этом, не теряя в эксплуатационных возможностях. Нужно отметить, что газотурбинный двигатель (ГТД) имеет большое количество лопаток, они довольно сложные и дорогие в изготовлении, т.к. имеют сложную геометрию и серьезные требования к структуре поверхностного слоя.

В технологическом процессе ремонта и восстановления поверхностей лопаток применяются комбинированные и комплексные методы, что позволяют в свою очередь получить необходимые свойства. Технологический процесс (ТП) ремонта и восстановления лопаток можно условно разделить на два этапа, на первом этапе лопатки подвергаются процессам восстановления геометрии и размеров с помощью методов наплавки и наварки, а на втором этапе с помощью различных методов отделочно-упрочняющих обработок (ОУО) получить необходимые свойства в поверхностном слое. Стоит заметить, что в последнее время для повышения эксплуатационных свойств, применяется функционально-ориентированные свойства (ФОС) их элементов [1].

Цель работы – определение основных особенностей синтеза технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД.

Для достижения данной цели необходимо решение следующих задач: принцип разделения лопаток на элементарные функциональные элементы, выполнить анализ особенностей действия неравномерного износа, выполнить анализ влияющих факторов на выносливость лопаток, рассмотреть возможности и методы наплавления, создать

алгоритм учитывающий разнообразие неравномерности износа при наплавлении, рассмотреть особенности процессов ОУО.

2. Основное содержание работы

Для удобства и лучшего описания процессов происходящих на поверхности лопаток, лопатки представляют, как систему, состоящую из разных элементарных функциональных элементов применяя при этом метод морфологического синтеза технических решений [2]. В данном случае мы разобьём сложнопрофильную форму пера лопатки на основные конструктивные элементы, что позволит нам лучше понимать и описывать функции, происходящие в процессе эксплуатации, что приводит к неравномерному износу, и тем самым назначать более уточнённые технологические воздействия в процессе ремонта.

Примеры функциональных элементов пера лопатки на рис. 1.

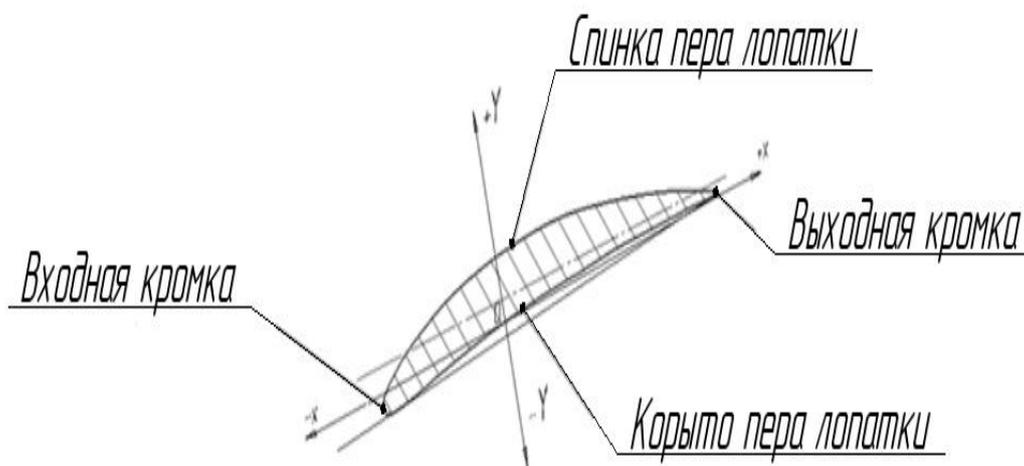


Рисунок 1. Основные элементы пера лопатки компрессора

Группы функциональных элементов можно представить в виде матриц [3].

Группа элементов спинки пера лопатки:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Группа элементов корыта пера лопатки:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & b_{m3} & \dots & b_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Группа элементов входной кромки:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Группа элементов выходной кромки:

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & d_{m3} & \cdots & d_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Общую структуру пера лопаток можно представить совокупностью четырех групп элементов: входной кромки, выходной кромки, спинки лопатки и корыта лопатки:

$$F = A \cup B \cup C \cup D \quad (5)$$

где F – общая структура пера лопатки; A – группа элементов спинки пера лопатки; B – группа элементов корыта пера лопатки; C – группа элементов входной кромки; D – группа элементов выходной кромки.

Лопатки ГТД имеют сложную форму и в процессе работы лопатки подвергаются различным видам воздействий, эти воздействия имеют неравномерный характер и тем самым приводят к неравномерному износу. Неравномерный износ по поверхности пера лопатки имеет довольно сложную структуру и сложную цепь взаимодействий, так авторы [4, 5] отмечают, что в процессе ремонта следует учитывать износы различных типов и по разным поверхностям. В процессе работы лопатки подвергаются износу под действием комплексных воздействий:

- воздействия инородных тел;
- температурные воздействия;
- абразивные воздействия;
- эрозионные воздействия;
- коррозионные воздействия.

В процессе эксплуатации кроме воздействий внешней среды на лопатки влияют силовые факторы определяемых самой конфигурацией лопаток и действием различных внешних сил показаны на рисунке 2.

На выносливость рабочих поверхностей лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях умеренно-повышенных температур и циклических нагрузок, влияет множество факторов, которые можно объединить в три основных группы: первая группа – конструктивные элементы, определяющие уровень концентрации напряжений сложнопрофильной формы лопаток, вторая – параметры микрогеометрии поверхности, третья – физико-механические свойства поверхностного слоя [6, 7].



Рисунок 2. Нагрузки и напряжения, действующие на лопатки

Рассмотрим общий технологический процесс ремонта и восстановления рабочих профилей лопаток ГТД, который изображен на рис.3, в общем виде можно представить, как четыре основных этапа:

- обработка перед процессом наплавления;
- технологический процесс наплавления;
- обработка восстанавливаемой детали для получения необходимой геометрии и свойств в поверхностном слое;
- обработка восстанавливаемой детали для повышения эксплуатационных свойств.



Рисунок 3. Общий технологический процесс восстановления и ремонта рабочих профилей лопаток ГТД

Для начала производится осмотр поврежденных рабочих поверхностей лопаток. Определяется степень повреждаемости. Повреждаемость – это совокупность характеристик, которые описывают изменение весовых характеристик, геометрических и физико-механических свойств, как основного материала, так и покрытия. Другими словами, повреждаемость – это степень изменения работоспособности. Повреждаемость рабочих поверхностей лопаток существенно оказывает влияние на характеристики двигателя (устойчивость работы, расход топлива и безопасность полетов).

Изношенные лопатки поступают для процесса очищения и если необходимо, то выполняют также процессы обезжиривания и травления, далее их подвергают дефекации. Дефектами детали называют различные отклонения, которые образовались в процессе износа. В процессе дефекации детали подразделяют на разные уровни в зависимости от степени износа из-за тех или иных факторов. Далее происходит механическая обработка изношенных лопаток для удаления слоев, которые получили изменение структуры, эти слои удаляются, чтобы наплавленный слой сцеплялся с основным материалом, который не потерпел сильного изменения структуры, тем самым уровень адгезии между основным металлом и наплавленным будет выше.

Перед процессом наплавки необходимо решить множество сложных задач: выбор термического режима выполнения наплавки; выбор материала, который позволит обеспечить свойства в зависимости от эксплуатационных функций; возможность наплавки данного материала на основной металл; выбор режима и способа наплавки, определение необходимой термообработки.

Для того чтобы восстановить геометрию рабочих поверхностей лопаток применяются различные методы наплавки (наварки):

- электронно-лучевая;
- аргонодуговая (ТИГ);
- плазменная;
- лазерная.

В работе Фомичева Е.О. [8] предлагается технологический процесс восстановления моноколес компрессоров ГТД, включая методы восстановления лопаток методом аргонодуговой и электронно-лучевой наплавки, результаты показали, что наплавленный слой имеет приемлемую макро и микроструктуры, но с увеличением глубины наплавки предел прочности уменьшается, поэтому есть рекомендация использования ручной аргонодуговой сварки на глубину не более 5 мм. Долговечность образцов которые прошли восстановление ниже, чем образцов цельных, но несущественно.

Если же мы получили довольно сильно изношенную лопатку, то предлагается использовать специальную подготовленную поверхность идентичную разрушенной или же лопатку донора, данный способ позволяет восстановить форму и геометрию лопатки, не потеряв в физико-механических характеристиках. Похожий метод описан в патенте № 2218016 Великобритания, В23Р[9]. Для того чтобы соединить изношенную лопатку и подготовленную поверхность применяют специальные зубчики рисунок 4, в результате чего мы получаем меньший концентратор напряжений в сварочном соединении и возможность восстанавливать более изношенные лопатки и тем самым производить ремонт большого количества изношенных лопаток не теряя при этом в структуре восстановленного слоя.

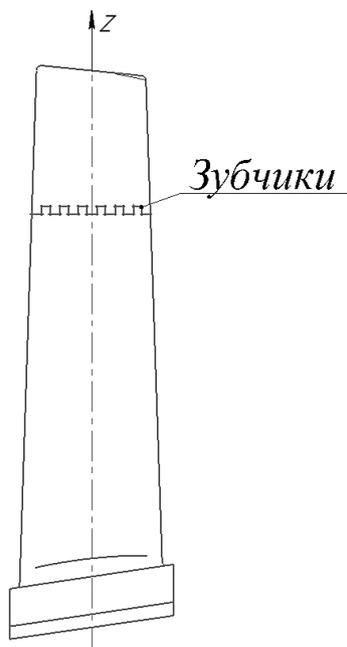


Рисунок 4. Применения зубчиков для ремонта лопаток ГТД

Следуя выше сказанному, сделаем алгоритм, изображенный на рисунке 5, для ручной аргодуговой наплавки с двумя вариантами, слоя наплавляются друг на друга, но будет ограничение в 5 мм, это ограничение обозначим $c=5\text{мм}$, следовательно $b \leq c$, где b – мм необходимые для наплавки, чтобы восстановить исходный контур лопатки.

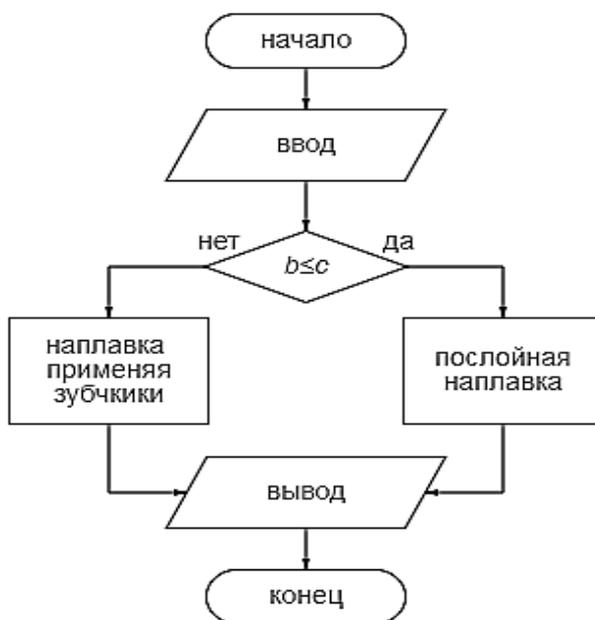


Рисунок 5. Алгоритм для ручной аргодуговой наплавки

Лопатки компрессора изготавливаются из двухфазного $(\alpha+\beta)$ титанового сплава (BT-8, BT8M-1). Получение требуемых механических свойств наплавленного

соединения достигается за счет выбора химического состава присадочной проволоки, система легирования должна быть близка к основному материалу. После наплавки, следует применять для снятия внутренних напряжений термообработку отжиг в вакууме.

После процесса наплавления, когда геометрические размеры рабочих поверхностей лопаток были восстановлены, но все еще остается лишний наплавленный слой, происходит механическая обработка для его снятия. Как правило, это происходит с помощью фрезерной операции. Далее нужно обеспечить в поверхностном слое необходимые физико-механические свойства, для этих целей используют различные операции ОУО. Разрушение лопаток имеет усталостный характер. Для увеличения выносливости лопаток компрессора необходимо увеличивать напряжения сжатия в поверхностном слое. Поэтому при оптимизации технологического процесса методами ОУО особое внимание обращают на:

- распределения общей глубины залегания сжимающих напряжений;
- распределение величины поверхностных сжимающих остаточных напряжений;
- распределение конструкционной и технологической концентрации напряжений;
- распределение степени наклепа поверхностного слоя.

Формирование напряженного состояния лопаток компрессора в процессе работы является суммированием рабочих нагрузок от постоянных растягивающих центробежных сил, циклических изгибающих моментов и внутренних остаточных напряжений [10].

Зависимость между пределом выносливости и соответствующими напряжениями [10, 11]:

$$\sigma_{-1} = \sigma_{-1исх} - c \cdot \sigma_{ост} \quad (6)$$

где $\sigma_{-1исх}$ – предел выносливости полированных образцов; c – коэффициент, зависящий от пластических свойств материала и формы детали; $\sigma_{ост}$ – максимальные остаточные напряжения в поверхностном слое;

Следовательно, в процессе синтеза технологического процесса нужно особое внимание уделить особенностям конструкции, распределению сил в процессе работы и возможностью регулировать воздействия, реализованные в технологическом процессе ремонта и восстановления рабочих поверхностей, тем самым получая необходимые свойства восстановленной лопатки, с помощью чего реализуется подход функционально-ориентированных технологий (ФОТ).

Представим в математическом виде основные особенности рекомендаций по ОУО:

$$\begin{aligned} A: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow \max \\ B: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow \max \\ C: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow \max \\ D: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow \max \\ F: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow \max \end{aligned} \quad (7)$$

где A – отображение структуры поверхности спинки пера лопатки; B – отображение структуры поверхности корыта пера лопатки; C – отображение структуры поверхности

входной кромки; D – отображение структуры поверхности выходной кромки; F – отображение общей структуры пера лопатки; $f(\sigma_{ост})$ – функция остаточных напряжений на поверхности, стремящиеся к максимальному значению;

Ограничение для реализации уровня остаточных напряжений задаётся в пределах от 0,5 до 1,1 от значений предела текучести материала, следовательно, зависимость 7 будет иметь вид:

$$\begin{aligned} A: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \\ B: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \\ C: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \\ D: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \\ F: f(\sigma_{ост}) &\rightarrow k\sigma_T \end{aligned} \quad (8)$$

где A – отображение структуры поверхности спинки пера лопатки; B – отображение структуры поверхности корыта пера лопатки; C – отображение структуры поверхности входной кромки; D – отображение структуры поверхности выходной кромки; F – отображение общей структуры пера лопатки; $f(\sigma_{ост})$ – функция остаточных напряжений на поверхности стремящиеся к значению зависящему от предела текучести и коэффициента ограничения; k – коэффициент ограничения имеющий значение от 0,5 до 1,1; σ_T – предел текучести материала.

3. Заключение

Рассмотрели основные особенности синтеза технологического процесса ремонта и восстановления. Рассмотрен один из возможных принципов разделения лопаток на функциональные элементы. Выполнен анализ особенностей неравномерного износа. Выполнен анализ влияющих факторов на выносливость лопаток. Рассмотрены методы наплавления, и создан алгоритм учитывающий разнообразие неравномерности износа при наплавлении. Рассмотрели особенности распределения остаточных напряжений при процессах ОУО.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. / А. Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
2. Настасенко В.А. Морфологический анализ - метод синтеза тысяч изобретений. - К.: Техніка, 1994. - 44 с.
3. Михайлов, А. Н. Синтез технологического процесса ремонта и восстановления лопаток компрессора ГТД / Михайлов А. Н., Огренич Д. В., Пичко Н. С., Недашковский А. П. // Машиностроение и техносфера XXI // Сборник трудов XXX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-17 сентября 2023 г. – Донецк: ДонНТУ, 2023. – С. 202-207. ISSN 2079-2670.
4. Михайлов, Д. А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально-ориентированного подхода. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д. А. Михайлов. - Донецк, 2016. - 22 с.
5. Михайлов, В. А. Совершенствование структурного и технологического обеспечения изготовления лопаток компрессора вертолетных газотурбинных двигателей на основе связанных технологий. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Михайлов, В. А. - Донецк, 2019. - 18 с.

6. Богуслаев А. В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей: Монография / А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин; Под ред. Д. В. Павленко, С. А. Субботина. – Запорожье: ОАО "Мотор Сич", 2009. – 468 с.

7. Петухов А. Н. Сопротивление усталости деталей ГТД /А. Н. Петухов. – М. : Машиностроение, 1993. – 332 с.

8. Фомичев, Е. О. Разработка способов восстановления моноколес газотурбинных двигателей. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 / Фомичев, Е. О. – Москва, 2013. – 18 с.

9. Патент № 2218016, Великобритания, В23Р. Способ ремонта облопаченных дисков. Опубл. 17.11.89.

10. Сазонов М. Б., Соловацкая Л. В. Влияние напряжённого состояния поверхностного слоя на выносливость лопаток компрессора газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 109-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-109-117.

11. Биргер И. А. Остаточные напряжения. - М.: Машгиз, 1963. 232 с.

Поступила в редколлегию 12.02.2024

УДК 621.45.038.7

Е. В. Овчинников, докт. техн. наук., **Т. Ф. Григорьева**, докт. техн. наук, профессор,
Д. А. Линник, канд. техн. наук, доцент, **Ю. А. Жуков**, инженер.
Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь
Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия
Тел./Факс: +375 (152) 684108; E-mail: ovchin@grsu.by

МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ

Введение механоактивированных нанодисперсных частиц и дисперсных частиц в высокомолекулярные матрицы приводит к получению композиционных частиц, отличающихся от структуры исходных материалов, получаемых по традиционным технологическим подходам. Установлен эффект увеличения активности композиционных полимерных материалов, содержащих в своей структуре механоактивированные нанодисперсные частицы гетерогенной структуры, сочетающих в себе неорганическое твердое ядро и полимерную оболочку. Исследована структура нанокomпозиционных материалов, содержащих МА частицы, поверхностная активность, физико-механические характеристики.

Ключевые слова: механоактивация, наночастицы, структура, свойства, композиты.

E. V. Ovchinnikov, T. F. Grigorieva, D. A. Linnik, Y. A. Zhukov.

MECHANICALLY ACTIVATE COMPOSITE MATERIALS ON A POLYMER BASE

The introduction of mechanically activated nanodispersed particles and dispersed particles into high-molecular-weight matrices leads to the production of composite particles that differ from the structure of the starting materials obtained using traditional technological approaches. The effect of increasing the activity of composite polymer materials containing in their structure mechanically activated nanodispersed particles of a heterogeneous structure, combining an inorganic solid core and a polymer shell, has been established. The structure of nanocomposite materials containing MA particles, surface activity, and physical and mechanical characteristics have been studied.

Keywords: mechanical activation, nanoparticles, structure, properties, composites.

1. Введение

Композиционные материалы, получаемые из различных по своей структуре матриц, могут удовлетворить потребность современной промышленности в увеличивающемся спектре применения различного типа конструкционных материалов [1, 2, 3].

Спектр использования современных композиционных материалов достаточно широк благодаря принципиально новым возможностям, которые открываются при получении композитов. Данный вид материалов применяется для создания современных авиационных лайнеров, например МС-21, космических аппаратов Союз, и товаров широкого потребления-расчесок, ручек, обложек для тетрадей и книг и т.п. Данная широкая гамма товаров требует новых подходов к созданию различного типа композитов. В частности, в последние десятилетия интенсивно развивается механохимический синтез различного типа модификаторов и композиций на основе природных и синтетических материалов [1, 2, 3]. Применяемые технологические решения в области механохимии позволяют создавать композиционные наноматериалы, композиты, получаемые литьем при непосредственном воздействии на расплав или непосредственно в процессе кристаллизации, когда существуют одновременно жидкая и твердая фазы. Это достигается путем воздействия физических полей и механическим перемешиванием расплава за счет контролируемых химических реакций.

© Овчинников Е. В., Григорьева Т. Ф., Линник Д. А., Жуков Ю. А.; 2024

Применение различных методов активации материалов позволяет существенно изменить эксплуатационные характеристики изделий, которые изготовлены из активных материалов [3–8]. Одним из перспективных методов активационного воздействия является механоактивация, сущность которой состоит в структурном модифицировании различного типа веществ за счет механического ударного воздействия на различного типа активаторы. Такой вид воздействия позволяет получить вид материала, структурно отличающийся от исходного, за счет накопления различного типа дефектов, изменения удельной поверхности, поверхностной энергии, появления различного типа фаз, в том числе, находящихся в нанометровом диапазоне, что и обуславливает высокую активность получаемого материала.

Перспективным направлением развития процесса механоактивации является совместное активирование полимеров, олигомеров, полимер-олигомерных соединений с твердыми частицами различной природы. Это обусловлено интересом к созданию эффективных модификаторов со структурой, состоящей из полимерной, олигомерной или полимер-олигомерной «шубы» и твердого ядра, в частности, силикатсодержащего или углеродсодержащего. Обычно данный процесс формирования механоактивированных частиц объясняется, исходя из возможности образования в композиционных частицах пространственных непрерывных структур, что обусловлено синергизмом взаимодействия высокомолекулярных матриц и твердых частиц органической и неорганической природы. В частности, модифицирующая эффективность слоистых силикатсодержащих материалов проявляется в результате интеркалирования макромолекул полимера в межслоевые прослойки силикатов, пространства (галереи) частиц наполнителя [2–8]. В результате данного процесса возможно расслоение твердой частицы с образованием наночастиц (дисперсность частиц находится в области от 1 нм до 100 нм), обладающих физическими, химическими, механическими параметрами, значительно превосходящими свойства исходных материалов.

Таким образом, исследование структуры полимерных материалов, модифицированных механоактивированными частицами, полученными по различным технологическим процессам с использованием высокоэнергетических воздействий, является актуальной задачей для современного машиностроительного материаловедения.

2. Методика эксперимента

В качестве исходных матриц для создания полимерных композиционных материалов (ПКМ) использовали традиционные многотоннажно выпускаемые отечественной промышленностью полимеры: эпоксидные, полиэфирные и эпоксидно-полиэфирные смолы.

Образцы для проведения испытаний в зависимости от состава матрицы получали методом литья в форму на промышленном оборудовании при режимах, рекомендованных для переработки базового полимерного материала в соответствии с требованиями соответствующих ГОСТ и ТУ.

Исследование физико-химической структуры полимеров, композиционных материалов и модификаторов проводили традиционными методами рентгеноструктурного анализа, оптической, ИК-спектроскопии по общепринятым методикам.

3. Результаты исследований

Согласно полученным данным [2] применение механоактивации для совместного активирования неорганических и органических соединений приводит к формированию наноразмерных композиционных частиц. В ходе процесса механоактивации происходит химическое взаимодействие между органической шубой частицы с кремнийорганическим ядром. Введение данных частиц с концентрацией до 5 % мас. в эпоксиполиэфирную матрицу не приводит к химическому взаимодействию между механоактивированной наноразмерной частицей и полимерной матрицей. Скорее всего, процесс влияния данных механоактивированных частиц заключается в физическом воздействии на полимерную матрицу, в результате чего в объеме полимера образуется сетка лабильных физических связей, что должно приводить к увеличению физико-механических характеристик композиционного материала [2].

Полученные результаты [2] по расчету основных параметров, определяющих термостимулированную деполяризацию изучаемых частиц и их композиций, указывают на существенные различия в зарядовой активности. Максимальным остаточным зарядом обладает механоактивированный диоксид кремния, минимальным – высокодисперсный диоксид кремния. Значения остаточного заряда композиционных частиц на основе диоксида кремния и одноосновных органических кислот находятся в области 900 пКл, что говорит о высокой зарядовой активности данных частиц и возможности их применения для модифицирования различных систем, в том числе и полимерных матриц. Значения плотности остаточного заряда хорошо коррелируют со значениями остаточного заряда. Термообработка существенно уменьшает зарядовую активность исследуемых образцов, о чем свидетельствуют значения заряда, оставшегося в момент достижения максимума тока.

Наибольшей зарядовой активностью при повышенных температурах обладают композиционные частицы на основе диоксида кремния и одноосновных органических кислот, потери заряда при нагревании составляют не более 38 %, в то время как для механоактивированного диоксида кремния – 56 %. Таким образом, наибольшую энергию, необходимую для снятия электростатического заряда, необходимо сообщить диоксиду кремния, затем следуют механоактивированный диоксид кремния и композиционные частицы на основе диоксида кремния и одноосновных органических кислот [2].

Заряд, существующий в композициях на базе диоксида кремния, характеризуется малыми значениями времени релаксации, которое показывает уменьшение значений заряда в e раз с течением времени. В результате исследований проведен расчет основных параметров, определяющих зарядовую активность дисперсных частиц, в том числе после механоактивации [2]. Показано, что проведение механоактивации увеличивает зарядовую активность дисперсных композиционных частиц, что делает данный вид энергетического воздействия перспективным для получения наноразмерных и нанофазных модификаторов полимерных матриц. Представляется возможным использование в качестве модификатора полимерных материалов композиционных частиц на основе механоактивированного диоксида кремния, так как данные частицы характеризуются высокими значениями остаточного заряда и времени релаксации [2]. Разработанные композиционные материалы на основе полимерных матриц, содержащих частицы механоактивированного SiO_2 , возможно использовать в автомобильной промышленности для создания различного типа конструкций.

В последние десятилетия в автомобильной промышленности широко применяют композиционные материалы, заменяя традиционные материалы. Это обусловлено тем, что композиционные материалы в большинстве обладают легкой массой, что снижает

вес автомобиля без ущерба для качества и надежности. Универсальный шарнир или карданный вал – это механический компонент, используемый для передачи крутящего момента и мощности от двигателя к дифференциалу заднеприводных автомобилей. Основным материалом для изготовления данного тяжелонагруженного узла автотракторной техники является высококачественная сталь (сталь 45, 1044, SM45C и т. п.). В случае, когда длина карданного вала превышает 1500 мм, стальные универсальные шарниры обычно изготавливаются из двух частей для увеличения собственной частоты основного тона, которая обратно пропорциональна квадратному корню из удельного модуля [3].

Композитные материалы имеют много преимуществ перед сталью из-за высоких значений удельного модуля упругости, что позволяет использовать цельный композитный вал в качестве замены стального, состоящего из двух частей. Валы, изготовленные из композиционных материалов, резонируют при более высоких частотах вращения и сохраняют более высокий запас прочности по сравнению с карданными валами, изготавливаемыми из стали. Несмотря на широкую номенклатуру разработанных композиционных материалов на основе полимерных матриц, промышленное применение в отечественном машиностроении получило ограниченное число марок с заданными функциональными характеристиками [1, 2].

Специфические условия эксплуатации изделий из термопластичных материалов конструкционного назначения обуславливают необходимость целевого модифицирования полимерных матриц, которое приводит к снижению недостатков базовых и, часто, к приобретению новых свойств термопластов, усилению их достоинств. К основным недостаткам традиционных конструкционных термопластов относят сравнительно невысокие физико-механические характеристики в сочетании с удовлетворительными триботехническими и теплофизическими характеристиками. Эти особенности термопластов практически не позволяют использовать их в немодифицированном виде для изготовления изделий, эксплуатирующихся в широких диапазонах температур и нагрузок, в различных условиях воздействия нагрузки, а также в средах пассивного и агрессивного характера. Активные центры макромолекул, наличие которых обусловлено химическим строением цепей и условиями синтеза, при агрессивном воздействии на полимерный материал, как правило, являются очагами разрушения матрицы [4, 5, 6]. При этом взаимодействие активных центров макромолекул с различными реагентами эксплуатационной среды (кислород, низкомолекулярные продукты деструкции полимера, влага и т.п.) приводит к снижению эксплуатационных характеристик материала.

Целевое модифицирование промышленно выпускаемых полимеров с использованием различных технологических приемов, физических воздействий, введения активированных ингредиентов, либо применения в качестве полимерной матрицы многокомпонентных полимер-олигомерных и полимер-полимерных гибридных смесей является наиболее простым и эффективным путем повышения служебных характеристик базовых полимерных связующих. Реализация данного подхода экономична, с точки зрения технологии сравнительно проста. Как следует из литературных данных, наполнение – есть сочетание полимеров с твердыми, жидкими, газообразными ингредиентами, которые относительно равномерно распределяются в объеме с непрерывной полимерной фазой.

Таким образом, многие задачи конструкционного полимерного материаловедения могут быть успешно решены с помощью оптимального выбора наполнителей и модификаторов. Выбор конкретного приема получения

интенсивность: $d_1 = 7,17 \text{ \AA}$ ($I/I_s = 100$), $d_2 = 3,57 \text{ \AA}$ ($I/I_s = 80$) и $d_3 = 3,37 \text{ \AA}$ ($I/I_s = 35$) (d_1 , d_2 , d_3 – межплоскостные расстояния соответствующих рентгеновских рефлексов; I , I_s – интенсивность исследуемого и максимального рефлекса соответственно). Рефлексы полимерных материалов налагаются на серию рефлексов каолинита в области $d = 4,47 - 3,74 \text{ \AA}$, поэтому нельзя судить о каких-либо изменениях параметров рефлексов полимерных материалов. Однако наблюдается перераспределение интенсивностей в рентгенограммах исследуемых материалов, что может свидетельствовать о структурных изменениях в исследуемых механоактивированных нанокomпозиционных порошковых материалах [1].

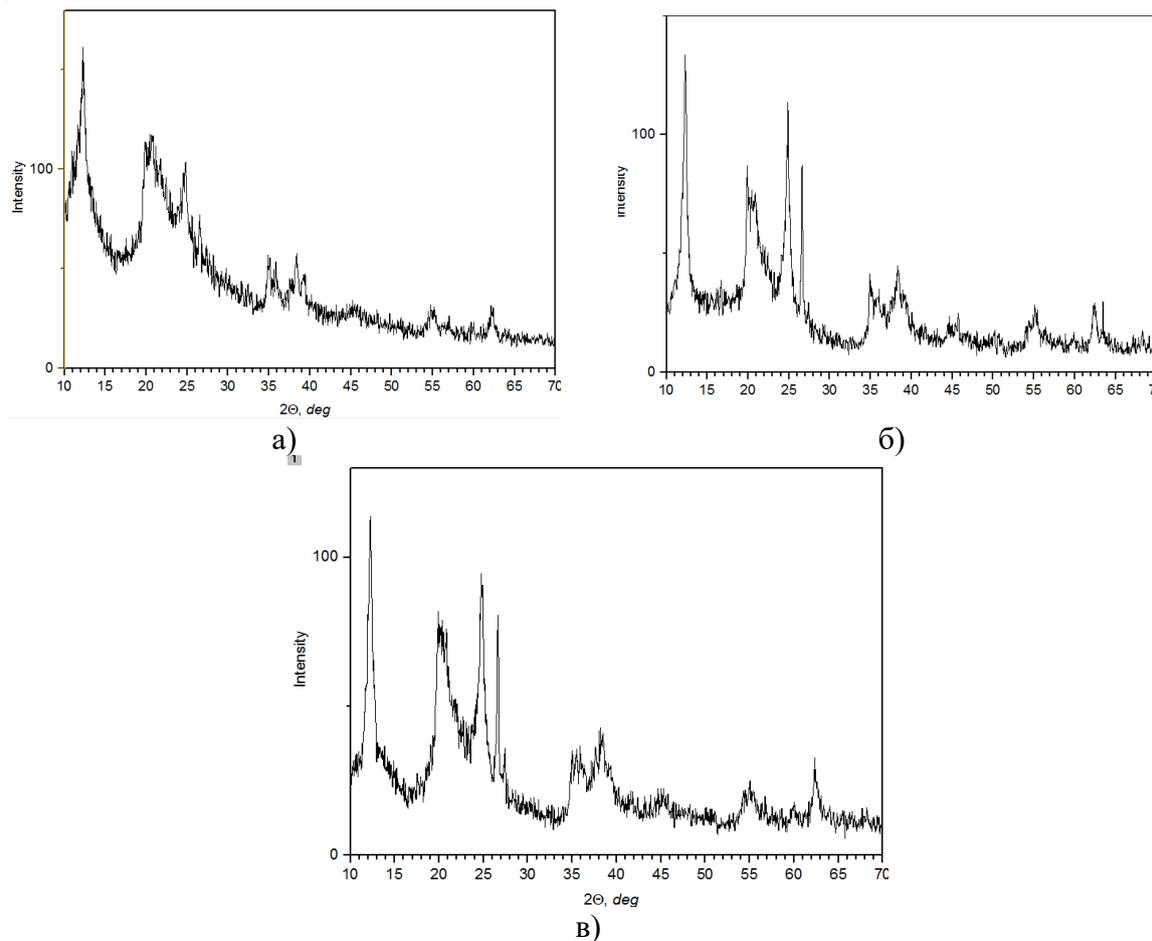


Рисунок 1. Рентгенограмма механоактивированных композиционных порошковых материалов: а-система «поливинилпирролидон ПВП + каолинит»; система «поливинилбутираль ПВБ + каолинит», система «поливинилбутираль ПВБ + каолинит» [2]

Уменьшение интенсивности рефлексов каолинита, их «размытие» в случае механоактивации смеси «поливинилпирролидон ПВП + каолинит» может свидетельствовать как об аморфизации кристаллитов данной смеси, так и об уменьшении геометрических размеров кристаллитов, т.е. увеличении дисперсности механоактивированных порошкообразных материалов. Это обусловлено более длительными временами механоактивации порошков исследуемого материала по

сравнению с системами «поливинилбутираль ПВБ + каолинит», «поливиниловый спирт + каолинит».

Определение теплофизических характеристик для данных механоактивированных нанокпозиционных материалов подтверждает процессы аморфизации кристаллических фаз при проведении процесса МА.

Разработана серия нанокпозиционных материалов на основе алифатических полиамидов, предназначенных для нанесения триботехнических покрытий на шлицевой соединение карданных валов [2]. При введении в состав полимерной матрицы механоактивированных наноразмерных частиц «поливинилбутираль ПВБ + каолинит», «поливиниловый спирт + каолинит» обеспечиваются повышенные значения адгезионной прочности и износостойкости вследствие формирования наночастиц структуры с повышенным упрочнением полиамидной матрицы в периферии наночастиц модификатора. Такие покрытия эффективны в узлах трения, эксплуатируемых с ограниченным подводом внешней смазки.

Для карданных валов грузовых автомобилей разработан состав композиционного материала, в котором использована синергическая смесь «поливинилбутираль ПВБ + каолинит», «поливиниловый спирт + каолинит» и фторсодержащего модификатора [2]. Вследствие наличия модифицирующих добавок различного состава и механизма действия формируется структура с повышенной износостойкостью благодаря образованию на поверхностях трения разделительного слоя из фторсодержащих и силикатсодержащих продуктов трибохимического превращения. Для формирования триботехнических покрытий узлов трения, эксплуатируемых без смазки, разработан композиционный материал на основе алифатических полиамидов, в котором роль смазочного компонента выполняют полиолефины [2]. При достижении в зоне контакта повышенных температур происходит плавление фазы полиолефина и образование на поверхностях трения разделительной пленки, снижающей коэффициент трения и интенсивность изнашивания.

Повышенной износостойкостью обладают покрытия из композиционного триботехнического материала на основе полиамида 6, модифицированного механоактивированной полимерной добавкой и сухой смазкой. Использование в качестве полимерной добавки дисперсного порошка механоактивированного полиамида 11 позволяет снизить уровень остаточных напряжений в покрытии и уменьшить расход дорогостоящего импортного полимера («Rilsan»), нашедшего в настоящее время широкое распространение в машиностроении [3-4].

Для карданных валов с повышенным эксплуатационным ресурсом разработан состав композиционного материала для триботехнических покрытий, в котором использована смесь механоактивированных наноразмерных наполнителей, один из которых является фторсодержащим олигомерным продуктом. Наличие в структуре фторсодержащего компонента обуславливает формирование на поверхностях трения разделительной пленки с низким сопротивлением сдвигу и способностью к знакопеременному переносу. Кроме того, механоактивированный фторсодержащий модификатор способствует упрочнению полиамидной матрицы благодаря формированию пространственной сетки межмолекулярных водородных связей по месту амидных и фторсодержащих групп. В результате такого модифицирования повышаются устойчивость к воздействию термоокислительных сред и гидрофобность покрытий на основе полиамида 6 [2].

4. Заключение

Таким образом, показано, что для создания новых видов модификаторов используют различного типа технологии, основанные на физических, химических, физико-химических принципах получения. В последние десятилетия для получения современных модификаторов, применяемых в химической промышленности, медицине, машиностроении, используется технология механохимического синтеза, заключающаяся в одновременном протекании как механического воздействия на модифицируемый материал, так и целенаправленного химического синтеза. В результате синергического воздействия формируются материалы, качественно отличающиеся по свойствам от исходных материалов, участвующих в синтезе модификатора. Предложены составы композиционных механоактивированных полимерных материалов для покрытий, позволяющие увеличить эксплуатационный ресурс карданных передач в 1.2-1.4 раза по отношению к существующим аналогам.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Григорьева Т. Ф. [и др.] Механохимический синтез дисперсных слоистых композитов на основе каолинита и ряда органических и неорганических кислот. Исследование методом ИК-спектроскопии // Неорганические материалы. – 1996. – Т. 32, № 2. – С. 214–220.
2. Овчинников Е. В. [и др.] Композиционные механоактивированные полимерные материалы машиностроительного назначения // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли: сб. науч. ст. 14-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей, Брянск, 5–7 окт. 2022 г. – Брянск: БГТУ, 2022. – С. 228–232.
3. Григорьева Т. Ф. [и др.] Механоактивированные наполнители для полимерных нанокompозитов на основе регенерированных термопластов // Веснік ГрДУ. Сер. 6. – 2011. – № 1 (116). – С. 25–28.
4. Овчинников Е. В. Механоактивированные модификаторы для реактопластичных полимеров // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. В 2 ч. Ч. 1: сб. докладов 13-го Междунар. симпозиума, Минск, 5-7 апр. 2023 г. – Минск: Беларуская навука, 2023. – С. 152-155.
5. Кравченко В. И. Структура и технология композиционных материалов для конструкций карданных передач серии «Белкард-2000». Дисс. ...канд. техн. наук: 05.02.01. – Гродно, 2001. – 140 с.
6. Bhajantri V. S. [et al.] Design and Analysis of Composite Drive Shaft // International Journal of Research in Engineering and Technology –2014 –№ 3 – Vol. 3 – P.738-745.
7. Bankar Harshal, Shinde Viraj, Baskar P. Material Optimization and Weight Reduction of Drive Shaft Using Composite Material // Journal of Mechanical and Civil Engineering – 2013. – №10 – Vol. 1 – P. 39 – 46.
8. Mehra N. [et al.] Thermal transport in polymeric materials and across composite interfaces. // Appl Mater Today. – 2018. – Vol. 12. – P. 92–130
9. Низкоразмерные системы: сб. науч. трудов / Под ред. В.Ф. Стельмаха и А.К. Федотова. – М.: 2000. –100 с.
10. Чвалун С. Н. Полимерные нанокompозиты // Природа. – 2001.– № 1. –С. 1-12.

Поступила в редколлегию 09.02.2024

УДК 880.3:539.386

Л. Ф. Сенникова, канд. техн. наук, **А. Н. Гангало**, канд. техн. наук,
Е. А. Свиридова, канд. физ-мат. наук, **С. В. Васильев** канд. физ-мат. наук,
В. М. Ткаченко, канд. физ-мат. наук
ФГБНУ «Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина», ДНР, Россия,
Тел. +7 949 3339801; Email: ludsennikova@mail.ru

ВЛИЯНИЕ РАЗОВОЙ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ГИДРОЭКСТРУЗИЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМц, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННОГО РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ

В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния разовой степени гидроэкструзии на структуру и механические свойства сплава АМц, предварительно деформированного равноканальным угловым прессованием и имеющего ультрамелкозернистую структуру. Установлено, что с увеличением степени разовой деформации гидроэкструзии, прочностные свойства сплава увеличиваются до 260,7 МПа при сохранении удовлетворительной пластичности материала. Методом рентгенографического анализа исследована тонкая структура сплава.

Ключевые слова: сплав АМц, механические свойства, структура, прочность, твердость, гидроэкструзия, равноканальное угловое прессование.

L. F. Sennikova, A. N. Gangalo, E. A. Sviridova, S. V. Vasiliev, V. M. Tkachenko,

THE EFFECT OF A SINGLE DEGREE OF DEFORMATION BY HYDROEXTRUSION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE AMc ALLOY PRETREATED BY EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING

The article considers the results of an experimental study of the effect of a single degree of hydroextrusion on the structure and mechanical properties of an AMc alloy preformed by equal-channel angular pressing and having an ultrafine structure. It is established that with an increase in the degree of single deformation of hydroextrusion, the strength properties of the alloy increase before 260,7 MPa while maintaining satisfactory ductility of the material. The thin structure of the alloy has been studied by X-ray analysis

Keywords: AMc alloy, mechanical properties, structure, strength, hardness, hydroextrusion, equal channel angular pressing.

1. Введение

Сплавы марки АМЦ характеризуются высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью, имеют хорошую жаропрочность, но имеют низкие прочностные свойства.

Известно, что одним из перспективных способов, обеспечивающих повышение прочности алюминиевых сплавов, является получение ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Одним из таких методов является равноканальное угловое прессование (РКУП), которое позволяет обеспечить высокую интенсивность и более однородное деформированное состояние материала. [1] Это расширило бы область применения алюминиевых сплавов в конструкциях, особенно в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Обзор последних достижений в области ИПД и свойств материалов после ИПД дан в работах [2, 3].

Однако методы ИПД не являются формообразующими, а предназначены для формирования структуры и свойств материала. Для дальнейшего же получения из этих заготовок изделий необходимо использовать традиционную обработку металлов давлением (ОМД). Поэтому в последнее время получение nano и ультрамелкозернистых металлов все больше концентрируется на комбинации методов ИПД и традиционных тех-

нологий обработки металлов давлением. В данном направлении проводятся многочисленные исследования.

В работах [4, 5] проведен анализ влияния комплексной обработки традиционных способов волочения и РКУП, на формирование ультрамелкозернистой структуры меди и ее способность достигать высокопрочного состояния в результате каждого из реализованных видов обработки. На примере медной проволоки исследованы особенности измельчения структурных составляющих и изменения механических свойств в ходе реализации разработанного авторами совмещенного процесса “РКУ-прессование–волочение”. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении степени измельчения структуры меди как на поверхности, так и в центральных областях проволоки. Это свидетельствует о равномерности получаемой структуры по сечению, а, значит, о стабильности механических свойств получаемой проволоки с ультрамелкозернистой структурой.

Автором работ [6, 7] исследовано влияние нового совмещенного процесса пластической деформации “прокатка-РКУ-прессование” на структуру и механические свойства меди. Деформирование проводилось при комнатной температуре, количество циклов – 3. Показано, что “прокатка-РКУ-прессование” приводит к существенному измельчению структуры технически чистой меди. Прочность медных заготовок повышается после 3 проходов в 2 раза. Временное сопротивление разрыву и условный предел текучести увеличиваются с 235 до 482 МПа и с 198 до 405 МПа соответственно, относительное удлинение уменьшается на 8%, относительное сужение на 7%. Установлено, что ультрамелкозернистая структура со средним размером зерен 2 мкм устойчива к последующему нагреву вплоть до 150°C.

В работе [8] высокая прочность была успешно получена в сплаве Mg – 9Li с помощью РКУП при комнатной температуре и последующей прокатки. В результате получены ультратонкие зерна размером от 500 до 700 нм.

Одним из перспективных методов ОМД, как монотонной деформации, является гидроэкструзия (ГЭ) Особенностью метода является выдавливание заготовок жидкостью высокого давления. По сравнению с другими способами ОМД гидроэкструзия имеет ряд преимуществ. При ГЭ уменьшается необходимое усилие деформации по сравнению с обычным прессованием, увеличивается равномерность деформации, как в поперечном сечении, так и по длине заготовки, снижаются силы трения в очаге деформации и тем самым повышается качество получаемого изделия. Кроме того, гидроэкструзией при меньших энерго- и трудозатратах можно существенно повысить прочностные свойства материала.

Известно, что в процессе последующей за ИПД пластической деформации происходит изменение исходного УМЗ состояния структуры. Причем характер этих изменений определяется схемой и условиями деформации [1]. Поэтому исследования влияния деформации гидроэкструзией на структуру и механические свойства сплава АМц, предварительно деформированного РКУП, являются актуальными.

Цель данной работы – изучить влияние гидроэкструзии на структуру и механические свойства алюминиевого сплава АМц, предварительно подвергнутого РКУП.

2. Материал и методы исследования

Материалом для исследований служил промышленный горячепрессованный пруток алюминиевого сплава АМц диаметром 60 мм, который проточили до диаметра 56 мм и отожгли при температуре 400°C с выдержкой 1 час. Химический состав сплава приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав алюминиевого сплава АМц

Fe	Si	Mn	Al	Cu	Zn	Примесей
до 0,7	до 0,6	1 – 1.5	96,35 - 99	0,05 – 0,2	до 0,1	до 0,15

Термическую обработку образцов проводили в лабораторной печи СНОЛ – 7,2/1100. Затем заготовку деформировали гидроэкструзией за два перехода до диаметра 29 мм и 20 мм. После каждого перехода был отжиг 400⁰С, 1 час. Далее полученные образцы сплава АМц деформировали, используя восемь переходов РКУП и его комбинацию с гидроэкструзией с разовой степенью деформации e 0,3; 0,6; 0,9; 1,2. Для исследования твердости заготовок после деформации и отжигов использовали твердомер Виккерса (HV 5).

Равноканальное угловое прессование осуществлялось с использованием прессы силой 100т.с. при комнатной температуре с использованием контейнера с рабочим диаметром каналов 20мм и углом пересечения $\theta = 90^\circ$ по схеме В_c (с поворотом заготовки на 90⁰ вокруг своей оси). Деформация за один проход РКУП $e \sim 1$. Маршрут деформации В_c является наиболее эффективным для получения равноосной ультрамелкозернистой структуры и обеспечивает наиболее высокие прочностные свойства материалов [1].

Гидроэкструзию осуществляли при комнатной температуре. Для реализации маршрута использовались контейнера высокого давления диаметрами 60, 32 и 20мм. Угол конуса матриц составлял $2\alpha=20-30^\circ$. В качестве рабочей жидкости было индустриальное масло И30. Для реализации процесса гидроэкструзии использовались прессы силой 500т.с. и 100т.с.

Механические испытания образцов сплава после деформации проводились на разрывной машине Р50 в соответствии с ГОСТом 1497 - 2023.

Структура образцов в исходном и деформированном состояниях исследовалась рентгенографически с помощью стандартного автоматизированного дифрактометра ДРОН-3М в фильтрованном СоК α излучении. Структурное состояние образцов характеризовалось средними размерами когерентно рассеивающих областей $\langle D \rangle$ и величиной микронапряжений $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$. Для определения значений этих параметров в работе использовался метод аппроксимации [9], в котором учитывались особенности условий съемки. Для анализа микроструктуры образцов сплава АМц использовались линии (111), (200), (222) и (400). В таком случае, общее число подгоночных параметров составляло 11: четыре интегральных амплитуды, четыре положения рефлексов, общее для всех рефлексов микронапряжение, размер блока и корректировочный параметр $2\Delta s/R$. Дифракционные картины снимались с продольного шлифа в направлении деформации гидроэкструзией. По дифракционным картинам определялась ширина дифракционных линий с индексами (111), (200), (222) и (400) (с учетом инструментального уширения), представляющих собой отражения различных порядков от кристаллографических плоскостей (100) и (111). Полученные таким образом значения ширины линий использовались для определения размеров о.к.р. $\langle D_{HKL} \rangle$ и среднеквадратичного уровня микронапряжений $\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$. Расчёты проводились в предположении, что гауссовская форма профиля каждого рефлекса представляет собой свёртку профилей, формируемых микронапряжениями, и дисперсными размерами блоков мозаики.

3. Результаты и их обсуждения

На рисунке 1 показано влияние числа переходов и степени деформации РКУП на твердость сплава по Виккерсу. Твердость сплава после отжига 400°C , 1 час соответствовала значению 401 МПа. После первого перехода РКУП твердость значительно возрастает до значения 576 МПа, а на последующих переходах интенсивность увеличения твердости снижается. После 8 проходов интенсивной пластической деформации методом РКУП твердость алюминиевого сплава АМц повысилась до 650 МПа.

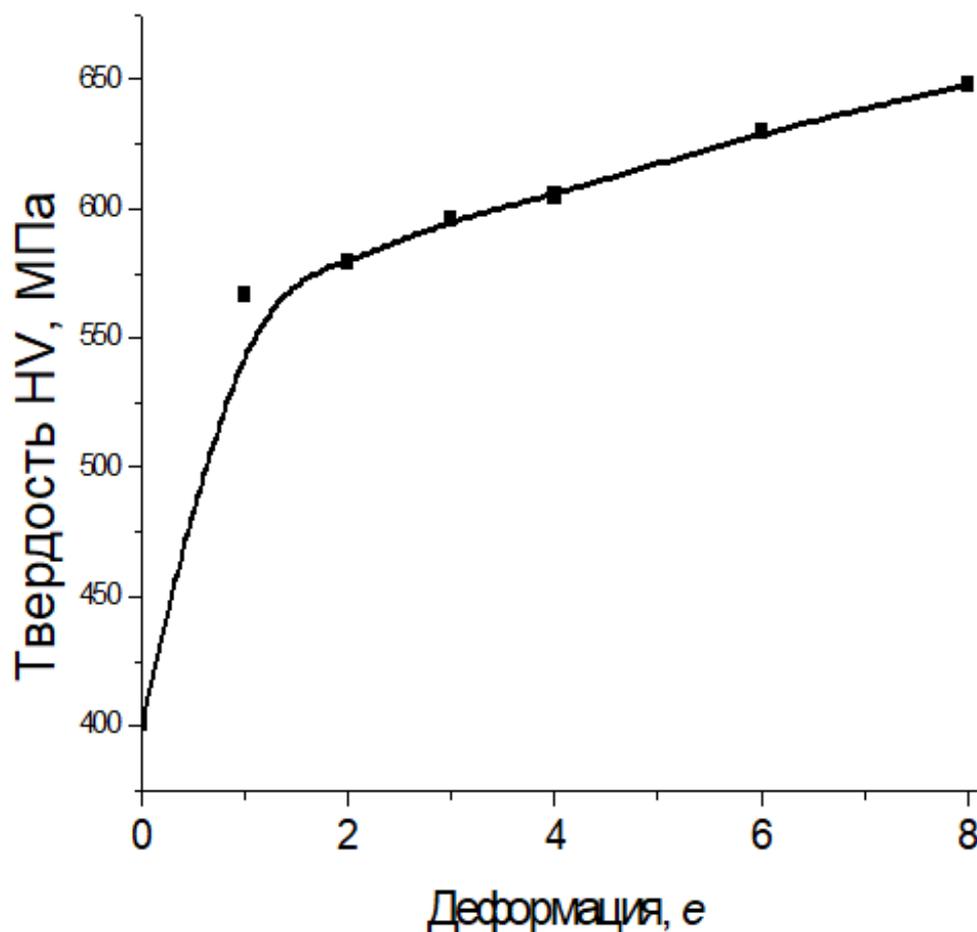


Рисунок 1. Зависимость твердости сплава АМц от степени деформации РКУП.

Дальнейшие исследования механических свойств алюминиевого сплава АМц после комбинированной деформации, включающей РКУП и последующую ГЭ, представлены в таблице 2

Из таблицы видно, что последующая ГЭ после РКУП даже с невысокой степенью деформации приводит к повышению прочностных свойств. Очевидно, что с увеличением разовой степени деформации ГЭ для сплава АМц предел прочности материала существенно повышается (на 19%) по отношению к значениям после деформации 8 РКУП, а твердость НВ – на (13%). Пластичность же сохраняется на удовлетворительном уровне: относительное удлинение уменьшается на 5%, а относительное сужение практически не изменяется, что весьма ценно для изготовления всевозможных профилей и деталей для машиностроения. Деформация по указанной комбинированной схеме

позволяет повысить твердость материала по отношению к отожженному состоянию в 1,9 раза.

Таблица 2. Механические свойства сплава АМц после комбинированной пластической деформации.

Обработка	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	HV, МПа
8 РКУП ($e = 8$)	218,6	14,1	61	648
8РКУП + ГЭ ($e = 0,3$)	230,4	13,9	63	636
8 РКУП + ГЭ ($e = 0,6$)	246,2	13,6	61,6	651
8 РКУП + ГЭ ($e = 0,9$)	254,2	13,5	60,3	677
8 РКУП + ГЭ ($e = 1,2$)	260,7	13,4	60,3	731

Рентгенографический анализ показал, что изменения параметров тонкой структуры, таких как размер блоков мозаики и микронапряжения кристаллической решетки носит весьма неустойчивый характер (таблица 3).

Таблица 3. Структурные параметры сплава АМц в исходном состоянии и после пластической деформации.

Тип обработки	(111) (200) (222) (400)			(111) (222)		(200) (400)	
	a , Å	D_{HKL} , нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} \times 10^{-4}$	D_{HKL} , нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} \times 10^{-4}$	D_{HKL} , нм	$\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2} \times 10^{-4}$
Отжиг 4000С, 1ч	4,0503(4)	>300	(2,8±0,8)	>300	(2,8±1)	>300	(2,3±1)
8 РКУП ($e = 8$)	4,0513(4)	106±4	(4,4±0,5)	258±83	(2,8±1)	102±5	(4,1±0,8)
8РКУП + ГЭ ($e = 0,3$)	4,0515(4)	74±2	0	74±2	(6,4±0,6)	67±2	0
8 РКУП + ГЭ ($e = 0,6$)	4,0505(3)	>300	(5,3±0,4)	>300	0	102±6	(4,4±1)
8 РКУП + ГЭ ($e = 0,9$)	4,0511(7)	131±8	(3,8±0,7)	160±20	(5,1±0,5)	97±4	0
8 РКУП + ГЭ ($e = 1,2$)	4,0505(2)	191±30	(7,5±0,5)	236±70	(4,5±0,8)	138±18	(7,5±0,8)

После деформации 8 РКУП величина блоков мозаики, была на уровне $D_{\text{HKL}}=106$ нм при микронапряжениях $4,4 \times 10^{-4}$, а после комбинированной деформации 8 РКУП+ГЭ ($e=1,2$) размер блоков стал больше $D_{\text{HKL}}=191$ нм, а напряжения кристаллической решетки выросли до $7,5 \times 10^{-4}$, это не совсем коррелирует с монотонным увеличением прочностных свойств сплава. Учитывая коллективный характер влияния дисперс-

ности структуры и микронапряжений кристаллической решетки на прочностные свойства, можно предположить, что вероятно основной вклад в упрочнение сплава вносит фаза $Al_6(Mn,Fe)$ – она является, своего рода, «арматурой» для структуры алюминиевой матрицы, поскольку она более плотная и ее частицы не когерентно связаны с алюминиевой матрицей, т.к. имеют другой тип кристаллической решетки и, согласно литературным данным [10], прочность этой фазы при деформации может увеличиваться до 48%.

4. Заключение

На основании анализа полученных результатов исследования, можно сделать следующие выводы.

В результате пластической деформации по комбинированной схеме обработки, с увеличением разовой степени деформации гидроэкструзией наблюдается монотонное повышение прочностных свойств сплава. При увеличении разовой степени деформации до $e = 1,2$, получено значительное упрочнение алюминиевого сплава АМЦ (в 1.9 раз) по отношению к отожженному состоянию материала. Пластичность остается на удовлетворительном уровне: относительное удлинение уменьшается на 5%, а относительное сужение практически не изменяется по отношению к значениям после деформации 8 РКУП, что весьма ценно для изготовления всевозможных профилей и деталей для машиностроения.

Предполагается, что основной вклад в упрочнение вносит фаза $Al_6(Mn,Fe)$. Прочность этой фазы при деформации может увеличиваться до 48%.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Р. З. Валиев, А. П. Жилиев, Т. Дж. Лэнгдон. / Объемные наноструктурные материалы: фундаментальные основы применения. Санкт-Петербург, Эко-Вектор, 2017. - 479 с.
2. K. Edalati et al. / Mater. Res. Lett. 2022, Vol 10, No 4, 163-256.
3. K. Edalati. Accepted Manuscript. / Materials Science & Engineering A 2018. Japan.
4. И. Е. Волокитина, А.В. Волокитин. / Физика металлов и металловедение, 2018, 119 (9), с, 971 – 976.
5. С. Н. Лежнев, И. Е. Волокитина, Е. А. Панин, А. В. Волокитин // Физика металлов и металловедение, 2020, 121 (7), с. 757 – 762.
6. А. М. Иванов. / Вестник Брянского государственного технического университета, № 10, 83, с. 19, 2019.
7. А. М. Иванов. // Вестник машиностроения, № 2, с. 81, 2017.
8. Klu E.E., Song D, Li K., Wang G, Cao B., Ma A.B. etc. / Mater. Sci. Eng. A. – 2021. -833. 142371.
9. С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. / М.: МИСИС, 2002. 360 с.
10. В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. Под редакцией академика В.И. Трефилова, / Киев, «Наукова думка», 1989. 255 с.

Поступила в редколлегию 09.02.2024

УДК 621.793.71

F. I. Panteleenko, a member- correspondent. NAN B, Ph. D., Professor, **V. A. Okovity**, Ph. D., **O. G. Devoino**, Ph. D., Professor, **T. I. Bendik**, Ph. D., **V. V. Okovity**, **A. A. Litvinko**, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Tel. / Fax+375 17 293-95-99, niil_svarka@bntu.by

V. M. Astashinsky, a member- correspondent. NAS B, D. Phys. - math. n., prof.

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

Tel. / Fax +375 17 284-24-91, ast@hmti.ac.by)

INFLUENCE OF THE QUALITY OF INITIAL M-ROLL POWDERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTILAYER PLASMA COATINGS

The article describes the influence of the quality of initial m-roll powders on the structure and properties of multilayer plasma coatings. The qualitative indicators of the heat resistance of the alloys and the resulting coatings are associated with the formation of a continuous oxide film on their surface during deposition, which prevents the interaction of an aggressive environment and material. Most modern nickel-based alloys used in technology used to form plasma coatings contain 6-12% aluminum, 20-30% chromium, and 0.15-1.0% reactive element (yttrium, tantalum, etc.). For spraying, five types of powders were used. Metallographic studies have established that calcium-thermal powders are conglomerates with a highly developed specific surface. However, the degree of sphericity can vary within very wide limits, and this shortcoming can probably be eliminated to a large extent by mechanical methods. Atomized powders have a spherical shape, but the peculiarity is that on the surface of some particles there is an alloy film that peels off during the preparation of thin sections and has a structure different from the body of the particle. For powders melted under flux, such a film is thicker and occurs on particles more often than for powders melted in vacuum. However, in both cases, X-ray microanalysis established that in the film, in comparison with the body of the particle, the oxygen content is increased by an order of magnitude and the aluminum content is several times higher.

Keywords: nickel-based metal alloys, oxide ceramics, calcium thermal powder, atomized powder, submerged flux melted powder, operational characteristics, morphology and structure.

Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, О. Г. Девойно, Т. И. Бендик, В. В. Оковитый, А. А. Литвинко, В. М. Асташинский

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ИСХОДНЫХ ПОРОШКОВ М-КРОЛЕЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ

В статье описаны влияние качества исходных порошков м-кролей на структуру и свойства многослойных плазменных покрытий. Качественные показатели жаростойкости сплавов и полученных покрытий связана с формированием на их поверхности при напылении сплошной оксидной пленки, которая препятствует взаимодействию агрессивной среды и материала. Большинство современных используемых в технике сплавов на основе никеля применяющихся для формирования плазменных покрытий, содержат 6-12 % алюминия, 20-30 % хрома, а также 0,15-1,0 % реактивного элемента (иттрия, тантала и др.). Для напыления было использовано пять типов порошков. Металлографическими исследованиями установлено, что кальцийтермические порошки представляют собой конгломераты с сильно развитой удельной поверхностью. Однако степень сферичности может изменяться в весьма широких пределах и, вероятно, этот недостаток в значительной степени может быть устранен механическими методами. Распыленные порошки имеют сферическую форму, но особенностью является то, что на поверхности некоторых частиц имеется пленка сплава, отслаивающаяся при приготовлении шлифов и имеющая отличную от тела частицы структуру. Для порошков, плавленных под флюсом, такая пленка более толстая и встречается на частицах чаще, чем для порошков, плавленных в вакууме. Однако в обоих случаях микрорентгеноспектральным анализом установлено, что в пленке по сравнению с телом частицы на порядок увеличилось содержание кислорода и в несколько раз - алюминия.

Ключевые слова: металлические сплавы на основе никеля, оксидная керамика, кальцийтермический порошок, распыленный порошок, порошок, плавленный под флюсом, эксплуатационные характеристики, морфология и структура.

© Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Bendik T.I., Okovity V. V., Litvinko A.A Astashinsky V. M.; 2024

1. Introduction

The main feature of the m-roll powder material (nickel-cobalt-chromium-aluminum-yttrium) is the ability to plastically relax stresses during the deposition process. The reason for their occurrence is an inconsistent change in the volumes during heating and cooling of the ceramic coating and the materials of the sprayed base of the part. As a result of high-temperature oxidation during operation, the plasticity of the metal base of the product deteriorates significantly, while the layer of ceramic formed during deposition is permeable to gases, so it is necessary to add a material with impact strength and high heat resistance characteristics to ceramics. The qualitative indicators of the heat resistance of alloys and the obtained coatings are associated with the formation of a continuous oxide film on their surface during deposition, which prevents the interaction of an aggressive medium and material [1–8]. For heat-resistant alloys, such a protective film is a film of Al₂O₃ aluminum oxide powder modified with oxides of other components of the obtained alloy. The film of chromium oxide Cr₂O₃, which has a higher fracture toughness than Al₂O₃, has a number of its drawbacks - the tendency to rapid evaporation of chromium oxide in an oxidizing environment when operating at temperatures above 1370 K; due to insufficient diffusion mobility, chromium has a lower rate of formation compared to aluminum. The most important is that it is chromium that contributes to the formation of Al₂O₃ oxide in the plasma nickel-aluminum coating, significantly increasing the activity of aluminum. And finally, it is chromium that can undergo internal oxidation and promote the formation of Al₂O₃ oxides. To optimize the content of chromium and aluminum in the plasma coating, it is important that there is a certain limiting concentration of aluminum in the alloy, which is necessary to obtain a continuous protective layer of Al₂O₃ oxide. The value of this limiting aluminum concentration decreases with increasing chromium concentration and increases with increasing test temperature. Most of the modern nickel-based alloys used in aviation and rocket technology used to form plasma coatings contain 6-12% aluminum, 20-30% chromium, and 0.15-1.0% reactive element (yttrium, tantalum, etc.) [3-6]. With an increase in the concentration of the reactive element, the production of new grains of oxides during deposition inside the film itself is inhibited and, in the presence of more than 0.82% yttrium, it completely stops, and the rate increases with oxygen diffusion. This is caused by a significant refinement of the oxide film and grain of the alloy and the formation of yttrium-rich phases - Ni₅Y, Ni₉Y, Ni₃Al₂Y, (NiCo)_{4.25}Al_{0.15}Y, which have low resistance to high-temperature oxidation. All this should be taken into account during the formation of the coating when optimizing the content of rare earth (REM) metals in the alloy. Therefore, the introduction of reactive elements into the plasma coating contributes to the absence of stresses in the film caused by internal oxidation. However, an increase in the concentration of the reactive element is limited by an increase in the rate of oxygen diffusion and the processes of alloy embrittlement [16]. Therefore, most NiCrAlYTa alloys for sputtering are limited to an oxygen content of up to 0.05%.

2. Structure and properties of M-rabbits

To study the properties of coatings, two methods were tested:

- plasma spraying in air (APS);
- low pressure plasma spraying (VPS).

In both cases, argon-hydrogen mixtures were used as plasma-forming gases. The plasma spraying method has a significant impact on the structure and properties of the coating. When using the APS - method, the oxygen content in coatings of powders melted in vacuum increases to 0.9-1.3 wt.%. These coatings have a characteristic layered structure due

to the formation of thin oxide films, which is the most significant difference from VPS coatings.

The test results of ZrO₂-7%Y₂O₃ HRC with plasma sublayers from AMDRY-995 powder are presented in Table 1.

Table 1. Test results of the HRC system ZrO₂-7%Y₂O₃ - AMDRY-995

№ п/п	Method application	Heat treatment of coatings	K _{1C} , MPa·m ^{1/2}	Number of thermal cycles up to coating failure	
				1100-20°	850-20°
1	APS	no	2,7±0,8	21...24	144
2	APS	1100°C, 2 hours	2,1±0,8	28...31	211
3	VPS	no	1,5±0,4	35...38	206
4	VPS	1100°C, 2 hours	1,1±0,2	30...36	-

According to the results obtained, the K_{1C} parameter has higher values for coatings with an APS sublayer compared to a VPS sublayer, which is primarily due to the higher surface roughness of the former. Nevertheless, the thermal fatigue of coatings with a sublayer is much higher. It should be noted that due to the increased effect of oxidation on the properties of HRC under operating conditions, the differences in the quality of HRC with APS and VPS - sublayer will be even more significant.

The quality of VPS - coatings is significantly affected by the spraying conditions, in particular, to increase the dispersion of the β - phase, complete penetration of the particles is necessary, which sets the lower limit of the plasma jet enthalpy and pressure in the chamber. On the other hand, in a dynamic vacuum, the evaporation of elements from the surface of powder particles is intensified. Thus, the evaporation of low-melting alloying elements limits the possibility of increasing the enthalpy of the plasma jet during the deposition of metal-chromium-aluminum-yttrium coatings.

Heat treatment makes it possible to change the structure of VPS - AMDRY powder coatings in the direction of improving the uniformity of phase distribution and increasing their thermal stability. In this case, however, the dimensions of the β-phase increase somewhat and diffusion of the base elements in the coating occurs. In APS coatings, oxide films are largely dissolved in the metal matrix, but the layering of the structure is not completely eliminated.

It has been established that for both types of HRC sublayers, the quality of metal-ceramic bonding somewhat deteriorates as a result of heat treatment (K_{1C} value decreases). In this case, the thermal fatigue of the HRC increases only in the case of the APS - sublayer, however, significantly, by 1.5 times (Table 2). This is explained by the fact that for APS - coatings during heat treatment, the most significant changes in the structure occur. The data obtained suggest that the mechanical properties of the ceramic layer deteriorate as a result of the heat treatment of the coating in vacuum.

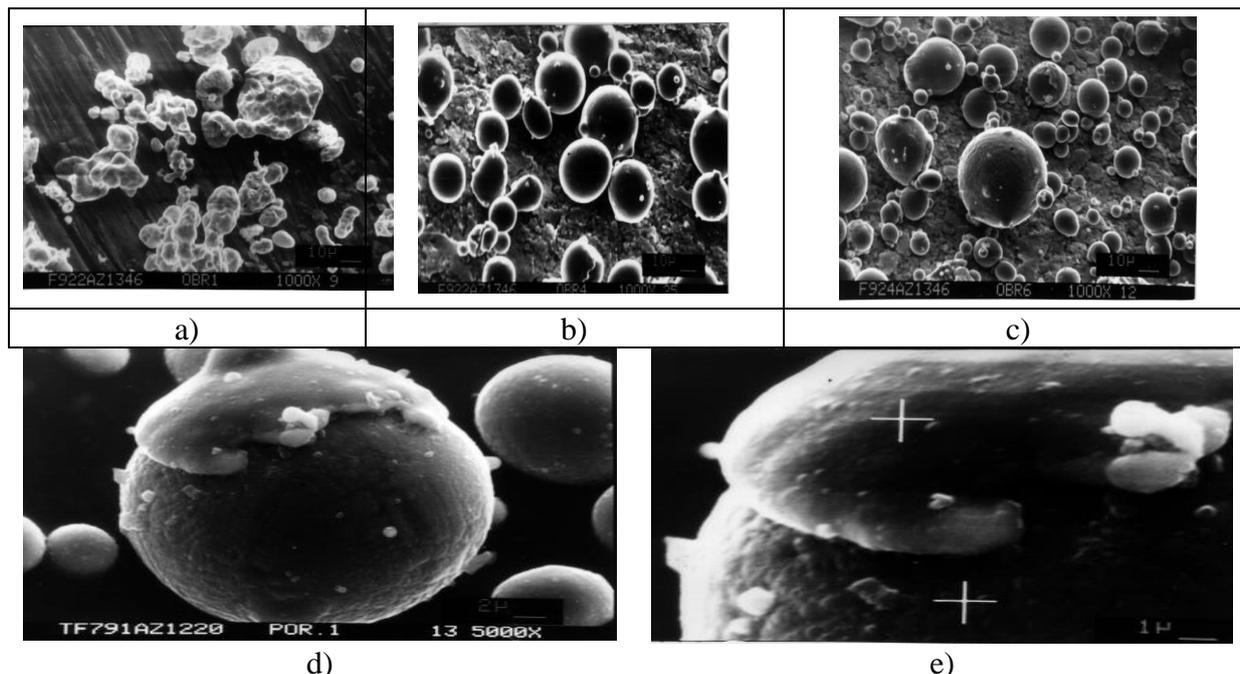


Figure 1. Morphology of powders of M-rabbits: a-calcium-thermal powders ПКХ27Ю7И; atomized powders b-Metco1037D; c-AMDRY 995) ($\times 1000$); obtained by submerged arc melting followed by sputtering with argon d- ПМ-1; e- ПМ-2) ($\times 5000$).

Three types of powders were selected for comparative studies (Fig. 1):

1) obtained by the calcium thermal method (ПКХ27Ю7И); 2) obtained by submerged arc melting followed by sputtering with argon (ПМ-1; ПМ-2);

3) obtained by melting in vacuum followed by sputtering with argon (Metco10370, AMDRY962).

Metallographic studies have established that calcium-thermal powders are conglomerates with a highly developed specific surface. However, the degree of sphericity can vary within very wide limits, and this shortcoming can probably be eliminated to a large extent by mechanical methods. Atomized powders have a spherical shape, but the peculiarity is that on the surface of some particles there is an alloy film that peels off during the preparation of thin sections and has a structure different from the body of the particle. For powders melted under flux, such a film is thicker and occurs on particles more often than for powders melted in vacuum. However, in both cases, X-ray microanalysis established that in the film, in comparison with the body of the particle, the oxygen content is increased by an order of magnitude and the aluminum content is several times higher. This allows us to conclude that the film is a metal layer oxidized during sputtering.

Comparison of the structures of powders of NiCoCrAlY - alloys indicates a uniform distribution of the β - phase in the γ - matrix for molten powders, while the formation of large (5-10 microns and more) homogeneous inclusions is characteristic of calcium-thermal materials, β - phase, as a rule, has a pronounced form.

In the X-ray microspectral analysis of impurities in the compared analyzes, the most significant differences were found in the oxygen content. The method of reductive melting in a carrier gas flow also revealed the dependence of the oxygen content on the fraction of calcium-thermal powders. From the powders of the NiCrAlY and CoCrAlY alloys, coatings were deposited on samples of the ЖС6К alloy by the low-pressure plasma spraying (VPS)

method. Some of the coatings (nickel-based alloys) were used as sublayers under the ZrO₂-Y₂O₃ heat-shielding ceramics. These samples were subjected to thermal cycling tests (heating to 1220°C, holding for 15 min., cooling into water). Another part of the coatings (cobalt-based alloys) was heat-treated and then oxidized at 1100°C for 5 hours. Before and after each test, the structure of the coatings was studied by optical and scanning electron microscopy. The following main patterns of structure formation of coatings and their behavior during testing were revealed. Nickel-based alloy coatings in the initial state are dense homogeneous layers in the case of sprayed powders, while for calcium-thermal powders, it is practically impossible to avoid some residual porosity of the coatings. This effect is probably associated with insufficiently effective degassing of calcium-thermal powders with a developed surface during their preparation and spraying. The structure of the coatings after sputtering almost completely repeats the structure of the original powders. At the same time, the dispersity of the structure in the coatings deteriorates in a number of powders used: melted in vacuum - melted under a flux - calcium-thermal. Thermal cycling tests at 1220°C for 1 hour lead to oxidation of the outer layer of metal sublayers, expressed for coatings from molten powders in the form of formed thin films with a depleted (non-etching) zone under them with a width of 25-30 μm. For coatings from thermal calcium powders, oxidation is expressed in the formation of oxide inclusions and even oxide interlayers at a depth of up to 25 μm, which indicates a significantly higher oxidation rate of such coatings caused by intense diffusion of oxygen through structural defects and extended phase boundaries. The destruction of coatings also occurs as a result of their diffusion interaction with the base. In this case, both the structure of the base and the coating are destroyed, and in both cases, these destructions increase in a series of coatings obtained from vacuum-melted, flux-fused, and calcium-thermal powders (Table 4).

As a result of high-temperature tests, the structure of the coatings is enlarged. At the same time, the structural heredity is preserved: the size of the phases in the coatings after the tests is the greater than it was before the tests. The structure of coatings from CoCrAlY powders after standard heat treatment also largely inherits the structure of the original powders, however, in this case, the differences in the shape and dispersion of phases in coatings from sprayed and calcium-thermal powders are even more pronounced.

Table 2. Properties of plasma coatings NiCoCrAlY/ZrO₂-7% Y₂O₃ (1 mm)

№ п/п	Base	Spray medium	Heat treatment in vacuum	σ _{сш} , MPa	850-20°C
1	40X10C2M (ЭИ107)	air	no	24	144
2		air	1050°C, 2 h	90	211
3		dynamic vacuum	no	108	206
4	20X25H20C2 (ЭИ283)	dynamic vacuum	1050°C, 2 h	236	220
1		air	no	28	139
2		air	1050°C, 2 h	142	237
3		dynamic vacuum	no	93	275
4		dynamic vacuum	1050°C, 2 h	278	301

Table 3. Results of X-ray microanalysis of the content of elements on the surface of ПМ-1 powder particles

Analysis	Content of elements Содержание элементов, %						
	aluminum	chromium	nickel	tantalum	oxygen	iron	iron
On a surface films	0,22	30,95	56,67	8,92	0,22	2,70	0,31
On a surface particles	0,06	29,63	57,22	10,61	0	1,88	0,61

Table 4. The width of the zone of destruction of the structure of the base ЖС6К and NiCrAlY - coatings as a result of their diffusion interaction during thermal cycling tests

Grade of powder for coating	Width of the destruction zone of the structure, microns	
	coating	bases
1. ПХ16Н77Ю6И	30-38	75-83
2. ПМ-1	20-23	65-73
3. АМДРУ962	15-18	58-60

Table 5. Change in the size of β - phases in NiCrAlY - coatings after thermal cycling tests

Grade of coating powder	Size range β - phases, μm	
	initial coating	coating after tests
1. ПХ16Н77Ю6И	1,0-5,3	2,0-6,6
2. ПМ-1	0,7-2,2	1,3-5,3
3. АМДРУ962	0,7-1,6	1,3-3,3

The structure of the coatings also changes accordingly after oxidation at 1100°C: the depletion zone under the oxide film increases in a series of coatings obtained from vacuum-fused, flux-fused, and calcium-thermal powders. In this case, however, the zone of destruction of the structure of the base as a result of diffusion interaction with the coating for all coatings is approximately the same, while the zone of destruction of the structure of the coating increases in the order similar to that described above (Table 6).

Table 6. Width of zones of destruction of the structure of CoCrAlY - coatings as a result of oxidation at 1100°C and diffusion interaction with the base of ЖС6К alloy

Powder brand for coatings	Width of the destruction zone of the structure, microns		
	coatings under oxide film	coating basics	basics
1. ПХХ27Ю7И	27-40	24-27	7-10
2. ПМ-2	14-21	10-17	7-11
3. Metco1037D	10-14	7-9	9-14

3. Conclusion

Thus, there is a direct relationship between the heat resistance of coatings of the MeCrAlY system and the morphology and structure of the initial powders. The developed surface of powders is highly undesirable for deposition of coatings of this type at reduced pressure, since this leads to the formation of residual porosity in the coatings, which accelerates their oxidation. Due to the heredity of the structure of powders by coatings, it is necessary that the initial powders have a uniform distribution of elements and a maximally

dispersed structure with the shape of phase inclusions having a small specific boundary surface. In particular, β - phases, with the approach of its shape to the spherical and more uniform distribution in the γ - matrix. Comparative studies of powders and coatings indicate that with a decrease in the oxygen content in them, the heat resistance of coatings increases.

LITERATURE

1. Panteleenko, F. I. Formation and study of multilayer composite plasma coatings based on M-rabbits and oxide ceramics with subsequent high-energy effects / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Devoino O. G., Volodko A. S., Astashinsky V. M., Uglov V. M. // International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and systems of mechanical engineering", DonNTU - Donetsk.-2021.№2.-p.68-83.

2.Panteleenko, F.I. Modern application of ceramic-metal coatings based on metal-chromium-aluminum-yttrium (M-rabbit) systems / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O.G., Sidorov V. A., Okovity V. V., Volodko A. V., Astashinsky V. M. // International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and systems of mechanical engineering", DonNTU - Donetsk.-2021. No. 3.-S.72-81.

3.Panteleenko, F. I. Formation and study of multilayer composite plasma coatings / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Astashinsky V. M., V. V. Uglov, V. I. // Bulletin of the Gomel State Technical University. #2. 2021.S.15-27.

4. Panteleenko, F. I. Overview of the modern application of ceramic-metal coatings / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V. A., Okovity V. V., Astashinsky V. M. // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. No. 3.2021. pp. 5-17.

5. Okovity, V. A. Optimization of the process of applying coatings from cermet powders by plasma spraying in air / Okovity V. A., Panteleenko F. I., Okovity V. V., Astashinsky V. M. // "Science and technology", BNTU - Minsk. -2021. Issue 5.- S.369-374.

6. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Switala F. (2022) Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll. Science and Technology. 21(2), 93–98.

7. Panteleenko, F. I. Selection of optimal parameters for deposition of multilayer plasma coatings from materials based on nickel M-rabbits / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Sidorov V.A., Okovity V. V., Astashinsky V. M., Svitala F., Blumenshtein V. M. // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2022. №1. pp.12-22.

8. Panteleenko, F. I. Options for deposition of multilayer coatings from ceramic powders and M-rabbits / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Sidorov V. A., Astashinsky V. M. // International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and systems of mechanical engineering", DonNTU - Donetsk. -2022.№1(76).C.66-72.

Поступила в редколлегию 12.02.2024

СОДЕРЖАНИЕ

Блюменштейн В. Ю., Нерсисян Д. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РУТНОН ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ.....	3
Борисенко В. Ф., Сидоров В. А. ОБОБЩЁННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТИПОВОЙ МНОГОСВЯЗНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	8
Бутенко В. И., Кадач Р. Г. ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ.....	19
Веремейчик А. И., Миширук М. В., Нерода М. В., Холодарь Б. Г., Миневич К. Д. ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 10Г2 ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ.....	25
Голубев В. С., Вегера И. И., Ходюш В. Е., Дьяченко О. В., Протасевич К. В. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ HARDOX 600 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА.....	32
Жирухин К. С., Киселёв Е. С. ПРИМЕНЕНИЕ БЫСТРОСМЕННЫХ ПАЛЕТНЫХ СИСТЕМ НУЛЕВОГО БАЗИРОВАНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ	38
Михайлов А. Н., Котляров В. Б., Котляров С. Б., Котляров Б. С. ВЫБОР БАЗ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ БЛОК-ВАЛА КОЛЕС В СБОРОЧНОМ ВАРИАНТЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	46
Михайлов А. Н., Огренич Д. В. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД.....	54
Овчинников Е. В., Григорьева Т. Ф., Линник Д. А., Жуков Ю. А. МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ.....	63
Сенникова Л. Ф., Гангало А. Н., Свиридова Е. А., Васильев С. В., Ткаченко В. М. ВЛИЯНИЕ РАЗОВОЙ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ГИДРОЭКСТРУЗИЕЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА АМц, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБРАБОТАННОГО РАВНОКАНАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ ПРЕССОВАНИЕМ.....	71

**Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Bendik T.I., Okovity V. V.,
Litvinko A. A, Astashinsky V. M.**

**INFLUENCE OF THE QUALITY OF INITIAL M-ROLL POWDERS ON THE
STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTILAYER PLASMA COATINGS..... 77**

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Блюменштейн В. Ю.	3
Борисенко В. Ф.	8
Бутенко В. И.	19
Васильев С. В.	71
Веремейчик А. И.	25
Вегера И. И.	32
Гангало А. Н.	71
Голубев В. С.	32
Григорьева Т. Ф.	63
Дьяченко О. В.	32
Жирухин К. С.	38
Жуков Ю. А.	63
Кадач Р. Г.	19
Киселёв Е. С.	38
Котляров Б. С.	46
Котляров В. Б.	46
Котляров С. Б.	46
Линник Д. А.	63
Миневич К. Д.	25
Михайлов А. Н.	46, 54
Миширук О. М.	25
Нерода М. В.	25
Нерсисян Д. А.	3
Огренич Д. В.	54
Протасевич К. В.	32
Свиридова Е. А.	71
Сенникова Л. Ф.	71
Сидоров В. А.	8
Ткаченко В. М.	71
Ходюш В. Е.	32
Холодарь Б. Г.	25
Astashinsky V. M.	77
Bendik T. I.	77
Devoino O. G.	77
Okovity V. A.	77
Okovity V. V.	77
Panteleenko F. I.	77
Litvinko A. A.	77

ПРАВИЛА

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

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

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

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

Статьи представляемые в данный сборник должны отвечать следующим требованиям.

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

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

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

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

Языки представления рукописей русский и английский.

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА

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

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий машиностроения. Интегрированные технологии. Сборка в машино- и приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии. Гибридные и комбинированные технологии машиностроения.
2. Механизация и автоматизация производственных процессов машиностроения. Прогрессивное оборудование машиностроительных производств.

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

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

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

6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.

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

8. Вопросы моделирования и расчетов сложных технологических систем машиностроения.

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

СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ

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

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

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

- формулирование цели и постановка задач работы;

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

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

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

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

• заявку и сведения об авторах статьи;

• материалы статьи;

• экспертное заключение о возможности публикации статьи в открытой печати;

• все материалы отправляются по E-mail по адресам: tm@fimm.donntu.ru или mntk21@mail.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

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

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

заключение или выводы, список литературы, дополнительные аннотации на других языках с ключевыми словами, внизу первой страницы необходимо указать авторский знак - ©. **УДК** печатать прописными (жирными) буквами в верхнем правом углу не отступая от верхнего поля. На следующей строке слева жирными строчными буквами – **инициалы и фамилии** авторов с учеными степенями и званиями, на следующих строках – полное название *организаций и стран* (через запятую, слева). На следующей строке курсивом слева – *тел./факс и электронный адрес* одного из авторов. Через один интервал - название статьи, печатать прописными (жирными) буквами, без переносов, центрировать по ширине, 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.; 2022 (10 pt).

10. Заключение (Conclusion) (12 pt)

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

11. Литература (References). (12 pt)

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

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

Тел./факс: +7-856- 301-08-40.

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

<http://ptsm.donntu.ru>

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

Образец оформления материалов
УДК 621.85.05-034(12 pt)

И. И. Иванов, д-р техн. наук, проф., **П. П. Петренко**, ассист. (12 pt)

Донецкий национальный технический университет, ДНР (12 pt)

Брянский государственный технический университет, Россия (12 pt)

Тел./Факс: +7 (856) 3050104; E-mail: tm@fimm.donntu.ru (курсив, 12 pt)

(пустая строка - 12 pt)

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

(пустая строка - 12 pt)

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

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

(пустая строка - 10 pt)

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

(10 pt)

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

The efficient design of assembly machinery is vitally important

.....

.....as noun description of functions of presented in the paper.

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

(пустая строка - 12 pt)

1. Введение (12 pt)

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

.....

(пустая строка - 12 pt)

2. Основное содержание и результаты работы (12 pt)

Для сборки изделий широко применяются технологические системы
.....

информационные и другие потоки могут быть описаны следующим образом:

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

где k_m - элемент множества;

.....
.....

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

(пустая строка - 12 pt)

3. Общий алгоритм и рекомендации (12 pt)

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм

.....

..... основывается на итерационном подходе.

(пустая строка - 12 pt)

4. Цифровые модели (12 pt)

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

.....

(пустая строка - 12 pt)

5. Заключение (12 pt)

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Разработать методику синтеза структурных вариантов

.....

..... отличительной особенностью данной методики.

2. Установить закономерности

.....

..... позволили произвести процесс итерации.

3. Разработать рекомендации

.....

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

..... внедрить на производстве.

(пустая строка - 12 pt)

ЛИТЕРАТУРА:

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

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

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

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

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

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

6. Сидоров, И. А. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / И.А. Сидоров, А.Н. Алехин //Наукоемкие технологии в машиностроении: ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – М: Машиностроение, 2014. - № 9. – С. 11-17.

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

пустая строка - 12 pt)

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

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Выпуск 4 (87)' 2024

Главный редактор

д-р техн. наук, проф. А. Н. Михайлов

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Технический редактор Д. О. Киселица

*Учредитель и издатель – ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ*

Адрес издателя: Россия, ДНР, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ФГБОУ ВО
«ДонНТУ»,

+7 (856) 337-17-33, 335-75-62

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

E-mail: tm@fimm.donntu.ru

Сайт: <http://ptsm.donntu.ru>

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