

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

ISSN:2618-8201

№ 4 (40)
2025

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования

«Севастопольский государственный университет»

№ 4(40)

2025

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Севастополь 2025

*Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»*

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 2025 г. №4 (40)

*Сборник научных трудов. Издание основано в 2016 году. Периодичность - 4 номера в год.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации выдано Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Серия № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.*

*Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
и размещается в научной электронной библиотеке (Elibrary.ru)*

*Свидетельство о регистрации в национальном центре ISSN и присвоение международного стандартного номера
серийного издания (International Standard Serial Number) 2618-8201 от 06.07.2018 г.*

В сборнике научных трудов публикуются статьи по следующим научным специальностям:

- 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки;*
- 2.5.6. Технология машиностроения; 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы;*
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;*
- 2.6.17. Материаловедение; 4.3.3. Пищевые системы.*

Главный редактор:

д.т.н., проф. Братан С.М.

Зам. главного редактора:

д.т.н., проф. Покинтелица Н.И.

Научный редактор:

к.т.н., проф. Харченко А.О.

Отв. секретарь:

к.т.н., доцент Возжзов А.А.

Техн. секретарь:

к.т.н., Стадник Т.В.

Редакционная коллегия

Абдулгасис У.А., д.т.н., проф. (г. Симферополь); Бохонский А.И., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Гусев В.В., д.т.н., проф. (г. Донецк); Дуюн Т.А., д.т.н., доц. (г. Белгород);

Карлов А.Г., к.т.н., доц. (г. Севастополь); Козлов А.М., д.т.н., проф. (г. Липецк);

Куликов Д.А., к.т.н., доц. (г. Москва); Лебедев В.А., к.т.н., проф. (г. Ростов-на-Дону);

Леонов С.Л., д.т.н., проф. (г. Барнаул); Лобанов Д.В., д.т.н., доц. (г. Чебоксары);

Малышева Г.В., д.т.н., проф. (г. Москва); Михайлов А.Н., д.т.н., проф. (г. Донецк);

Носенко В.А., д.т.н., проф. (г. Волжский); Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Осипов К.Н., д.т.н., доц. (г. Севастополь); Полтавец В.В., д.т.н., проф. (г. Донецк);

Соколов С.А., д.т.н., проф. (г. Донецк); Суслов А.Г., д.т.н., проф. (г. Брянск);

Федонин О.Н., д.т.н., проф. (г. Брянск); Юшина Ю.К., д.т.н., проф. (г. Москва);

Якубов Ч.Ф., к.т.н., доц. (г. Симферополь); Ярошенко А.А., д.т.н., проф. (г. Севастополь);

Яшонков А.А., к.т.н., доц. (г. Керчь).

Мнение авторов статей, представленных в сборнике научных трудов, может не совпадать с мнением редакции.

Все статьи проходят обязательное рецензирование и проверку сервисом «Антиплагиат».

Издание осуществлено на средства авторов и распространяется бесплатно.

Дата выхода в свет: 20.12.2025 г.

Тираж: 25 экз.

Адрес редакции: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 222, <http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>;

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1362; e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Адрес издателей: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», бульвар 50 лет Октября, д.7, Брянск, 241035, Российская Федерация; ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация.

Адрес типографии: г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Стадник Т.В., Пахалюк А.В., Братан М.И.</i> Системный анализ операции ленточного ротационного полирования.....	4
<i>Репинский Б.А., Солнцева Д.С., Сущевский И.Р., Рошупкин С.И.</i> Применения 3D-сканирования для воссоздания геометрии деталей в машиностроении.....	13
<i>Вожжов А.А., Колесов А.Г., Братан М.И., Бунин О.А.</i> Экспериментальное исследование процесса внутреннего шлифования заготовок из сплава В95.....	17
<i>Графова А.Е., Петров Д.В. Харитонов А.В., Юрьев Д.А.</i> Аналитический обзор методов прецизионной обработки полупроводниковых материалов.....	23
<i>Черепанин Д.А., Макамутдинова А.А., Богуцкий В.Б.</i> Системный анализ проблемы автоматического контроля и подналадки на основе эволюционной модели.....	31

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Сергеев Д.Г., Остальцева Д.В., Маринин Е.А., Некрасов Р.Ю.</i> Исследование влияния параметров лазерного импульсного упрочнения на твердость и глубину модифицированной зоны при обработке режущего инструмента.....	37
<i>Гордеева Э.С.</i> Влияние отделочно-упрочняющей обработки на механические и эксплуатационные свойства деталей машин из высокопрочных материалов.....	48

РАЗДЕЛ III ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Ерёменко Д.О., Чуб О.П.</i> Анализ рынка батончиков мюсли и соевого мяса.....	52
--	----

РАЗДЕЛ I МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.923

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОПЕРАЦИИ ЛЕНТОЧНОГО РОТАЦИОННОГО ПОЛИРОВАНИЯ

***Т.В. Стадник¹,
А.В. Пахалюк¹,
М.И. Братан¹***

¹Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Для успешного внедрения в промышленное производство технологии ленточного ротационного полирования требуется разработка комплексных методик, учитывающих динамическое поведение технологической системы в процессе обработки. Создание эффективных систем управления технологическим циклом невозможно без построения адекватной математической модели, которая должна отражать все ключевые аспекты данного процесса. В связи с этим возникает необходимость рассмотрения операции полирования как сложной динамической системы с последующим изучением ее структурных особенностей и функциональных взаимосвязей.

В основе предлагаемого системного анализа процесса ленточного ротационного полирования лежит методология определения взаимосвязей между основными элементами технологической системы и характеристиками процесса. Выявление этих взаимосвязей является фундаментальной задачей для формирования структуры модели, способной учесть стохастическую природу процесса полирования, обусловленную случайным характером расположения и износа абразивных зерен, неоднородностью обрабатываемого материала и изменяющимися условиями взаимодействия в зоне контакта.

В статье представлен детальный структурный анализ процесса ленточного ротационного полирования, в рамках которого технологическая система декомпозирована на пять основных взаимодействующих подсистем: полировальная лента, обрабатываемая заготовка, зона контакта, оборудование с оснасткой и смазочно-охлаждающая технологическая среда. Для каждой подсистемы идентифицированы ключевые входные и выходные параметры, определяющие ее функционирование и влияние на общий технологический процесс.

Практическая значимость проведенного исследования заключается в создании методической основы для разработки адаптивных систем управления процессом ленточного ротационного полирования, обеспечивающих стабильно высокое качество обработки при минимальной себестоимости операций. Результаты работы могут быть использованы при проектировании специализированного оборудования, создании систем автоматизированного управления и разработке технологических регламентов операций финишной обработки поверхностей.

Ключевые слова: ленточное ротационное полирование, системный анализ, математическое моделирование, технологическая система, подсистема, входные и выходные параметры.

SYSTEM ANALYSIS OF ROTARY BELT POLISHING

*T.V. Stadnik¹,
A.V. Pakhaliuk¹,
M.I. Bratan¹*

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

For the successful implementation of belt rotational polishing technology in industrial production, it is necessary to develop comprehensive methodologies that take into account the dynamic behavior of the technological system during processing. Creating effective control systems for the technological cycle is impossible without constructing an adequate mathematical model that reflects all key aspects of the given process. In this regard, a need arises to consider the polishing operation as a complex dynamic system, followed by the study of its structural features and functional interrelationships.

The proposed system analysis of belt rotational polishing process is based on a methodology for determining the relationships between the main elements of the technological system and process characteristics. Identifying these relationships is a fundamental task for forming the structure of a mathematical model capable of taking into account the stochastic nature of polishing process, which arises due to the random arrangement and wear of abrasive grains, workpiece material heterogeneity and varying interaction conditions in the contact zone.

The article presents a detailed structural system analysis of belt rotational polishing process, within which the technological system is decomposed into five main interacting subsystems, namely polishing belt, workpiece, contact zone, equipment with tooling and cutting fluid (coolant-lubricant technological environment). Key input and output parameters that determine its functioning and influence on the overall technological process have been identified for each subsystem.

The practical value of the study lies in establishing a methodological foundation for developing adaptive control systems for the belt rotational polishing process, which ensure consistently high surface quality while minimizing operational costs. The results can be applied in the design of specialized equipment, development of automated control systems and preparation of technological regulations for finishing operations.

Keywords: belt rotational polishing, system analysis, mathematical modeling, technological system, subsystem, input and output parameters.

Постановка проблемы. Современное машиностроение и приборостроение предъявляют повышенные требования к качеству поверхностного слоя деталей, которое является ключевым фактором, определяющим их эксплуатационные характеристики, такие как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость [1-2]. Среди финишных методов обработки, обеспечивающих получение высоких классов шероховатости и заданных физико-механических свойств поверхности, особое место занимает ленточное ротационное полирование [3].

Данный процесс позволяет эффективно производить обработку, обеспечивая высокую производительность и стабильность результатов. Однако процесс ленточного ротационного полирования характеризуется значительной сложностью и стохастичностью, обусловленной большим количеством взаимовлияющих факторов. К ним относятся переменные свойства полировальной ленты (гранулометрический состав, тип абразива, структура связки), параметры режимов обработки (скорость движения ленты, давление, подача), характеристики

обрабатываемого материала, а также интенсивное тепловыделение и сложные механические взаимодействия в зоне контакта и др.

Эмпирический подход к назначению технологических параметров обработки часто оказывается недостаточно эффективным, требуя многочисленных дорогостоящих экспериментов и не гарантируя достижения оптимального качества. В этой связи актуальной задачей является разработка научно обоснованных методов управления процессом на основе его математического моделирования [4-8]. Математическое моделирование открывает возможности для решения ряда практических задач, таких как:

- обоснованный выбор и проектирование специализированного оборудования.
- оптимизация режимов и условий обработки для достижения заданных показателей качества при минимальной себестоимости.
- прогнозирование износа инструмента и стабильности технологического процесса.
- создание адаптивных систем управления, компенсирующих возмущающие воздействия.

Однако, разработка математических моделей процесса невозможна без установления количественных взаимосвязей между входными, управляющими и выходными параметрами технологической системы.

Целью статьи является проведение системного анализа операции ленточного ротационного полирования, заключающегося в выявлении и формализации взаимосвязей между элементами технологической системы и параметрами процесса, с учетом стохастической природы изменений, происходящих в процессе обработки.

Основная часть. Ленточное ротационное полирование представляет собой сложный технологический процесс, состоящий из совокупности взаимосвязанных операций, образующих целостную систему. Для анализа данного процесса необходима его декомпозиция на структурные компоненты с последующим установлением функциональных связей между ними. Технологическая система ленточного ротационного полирования может быть структурно разделена на несколько ключевых подсистем (рисунок 1):

– Подсистема полировальной ленты – включает исходные пространственные параметры, динамические силы, структуру и свойства режущих зерен, а также процессы износа и изменения химического состава связки и зерен. Эта подсистема генерирует основные движущие силы, воздействующие на обрабатываемую поверхность, определяет интенсивность и качество снимаемого слоя материала.

– Подсистема заготовки – характеризуется начальными геометрическими параметрами, физико-механическими и химическими свойствами материала, а также изменениями этих характеристик в ходе полирования. Взаимодействие заготовки с лентой формирует динамические силы и тепловые потоки, влияет на геометрию и состояние поверхности.

– Подсистема зоны контакта – ключевая область взаимодействия, где возникают силы трения, температурные поля и активные процессы микро- и макрообработки. В зоне контакта происходит формирование новых характеристик поверхности, износ зерен абразива и отвод тепла. Параметры этой зоны отражают состояние всего технологического процесса.

– Подсистема станка и приспособления – ответственна за пространственное расположение механизмов, регулировку режимов обработки, восприятие реактивных сил и тепловых потоков. Надежность и точность механизмов в этой подсистеме определяют стабильность процесса, точность обработки и ресурс оборудования.

– Подсистема смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) – обеспечивает снижение температуры в зоне резания, смазку контактных поверхностей и удаление продуктов износа. Химико-физические свойства СОТС существенно влияют на динамику тепловых процессов, износ ленты и качество полирования.

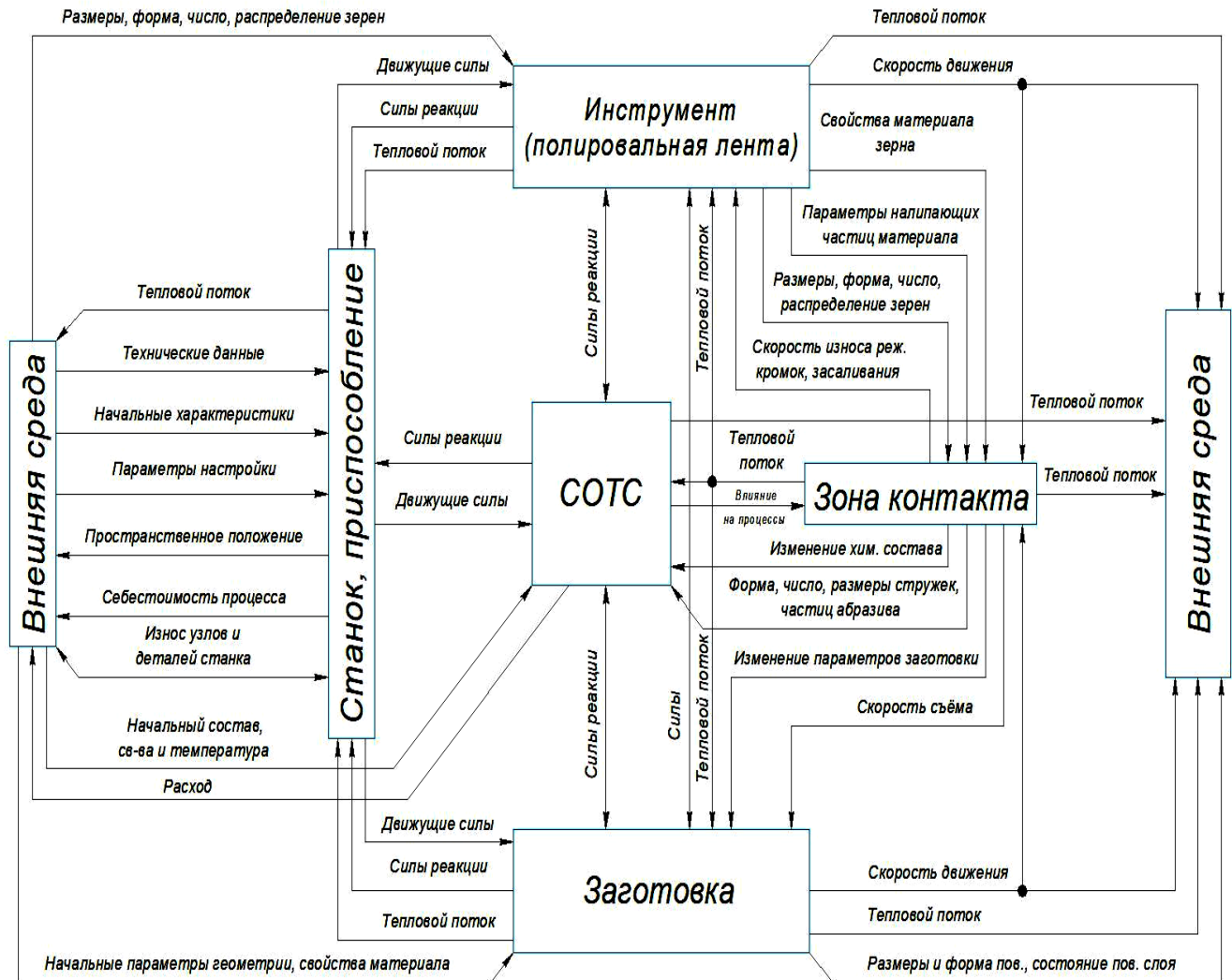


Рисунок 1. Структурная схема процесса ленточного ротационного полирования

На процесс полирования оказывает влияние совокупность изменяющихся входных, управляющих и возмущающих воздействий (таблица 1).

Таблица 1. Основные входные и выходные переменные подсистемы ленточного ротационного полирования

Подсистема	Входные переменные, начальные условия	Выходные переменные
Инструмент (абразивная лента)	1. Начальное пространственное положение; 2. Движущие силы полировальной ленты; 3. Размеры, форма, число, распределение единичных зерен; 4. Силы, действующие от заготовки на полировальную ленту;	1. Координаты положения относительно заготовки; 2. Распределение, форма, размеры, число режущих кромок; 3. Физико-механические и химические свойства материалов зерна и связки; 4. Силы, действующие от

Подсистема	Входные переменные, начальные условия	Выходные переменные
	5. Скорости износа режущих кромок зерен, засаливания полировальной ленты; 6. Тепловой поток в полировальную ленту из зоны контакта; 7. Силы реакции СОТС, охлаждающее, смазывающее и химическое действие СОТС на полировальную ленту;	абразивной ленты на заготовку; 5. Скорости движения полировальной ленты и режущих кромок; 6. Количество, геометрия и свойства налипающих частичек материала; 7. Силы реакций на станок, приспособление, СОТС; 8. Тепловой поток в СОТС, станок и среду;
Станок-приспособление	1. Технические данные станка и приспособления; 2. Начальные характеристики положения деталей станка; 3. Параметры настройки станка; 4. Силы реакций на станок, приспособление от полировальной ленты, заготовки, СОТС; 5. Износ узлов и деталей станка; 6. Тепловой поток в станок от заготовки, полировальной ленты;	1. Пространственное расположение исполнительных механизмов; 2. Износ узлов и деталей станка; 3. Себестоимость процесса; 4. Тепловой поток в среду; 5. Движущие силы полировальной ленты, заготовки, СОТС;
Заготовка	1. Начальное пространственное положение; 2. Начальные параметры геометрии; 3. Физико-механические и химические свойства обрабатываемого материала; 4. Силы, действующие от полировальной ленты на заготовку; 5. Движущие силы заготовки; 6. Силы реакции на заготовку; 7. Скорость съема материала; 8. Изменение размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств материала поверхностного слоя заготовки; 9. Тепловой поток в заготовку из зоны контакта;	1. Координаты положения относительно полировальной ленты; 2. Скорость движения заготовки; 3. Размеры, форма поверхности, состояние поверхностного слоя; 4. Силы, действующие от заготовки на полировальную ленту; 5. Силы реакции на станок, приспособление, СОТС; 6. Тепловой поток в среду, станок, СОТС;
Зона контакта	1. Пространственное расположение инструмента; 2. Скорости движения полировальной ленты и режущих кромок; 3. Распределение, форма, размеры, число режущих кромок; 4. Физико-механические и химические	1. Силы реакции на полировальную ленту, заготовку, СОЖ; 2. Тепловой поток в инструмент, заготовку, СОТС, стружку; 3. Скорости износа режущих кромок зерен, засаливания

Подсистема	Входные переменные, начальные условия	Выходные переменные
	свойства материалов зерна; 5. Силы, действующие от полировальной ленты на заготовку; 6. Скорость движения заготовки; 7. Пространственное расположение заготовки 8. Силы, действующие от заготовки на инструмент; 9. Влияние СОТС на процессы зоны контакта; 10. Количество, геометрия и свойства налипающих частичек материала;	полировальной ленты; 4. Изменение химического состава СОТС; 5. Скорость съема материала; 6. Изменение размеров, формы, шероховатости поверхности, физико-механических свойств материала поверхностного слоя заготовки; 7. Формы, число и размеры стружек, частиц абразива;
СОТС	1. Начальный состав, свойства и температура СОТС; 2. Изменение химического состава СОТС; 3. Формы, число и размеры стружек, частиц абразива; 4. Движущие силы станка; 5. Силы реакции от полировальной ленты, от заготовки; 6. Тепловой поток от полировальной ленты, заготовки, станка;	1. Силы реакции, охлаждающее, смазывающее и химическое действие СОТС на заготовку и полировальную ленту; 2. Силы реакции на станок; 3. Тепловой поток в среду; 4. Расход СОТС; 5. Влияние СОТС на процессы зоны контакта;

Каждая из подсистем имеет свой набор свойств, параметров состояния, историю развития, вектор входных и выходных переменных, их поведение может быть представлено в виде функционала, характеризующего состояние технологической системы:

$$Z(\tau) = F[Z(\tau - \Delta\tau), X^n(\tau)] = F[Z(\tau - \Delta\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau)], \quad (1)$$

где $Z(\tau)$ – вектор параметров состояния системы; $X^n(\tau)$ – вектор входных сигналов системы; F – закон отображения; $w^n(\tau)$ – вектор возмущающих воздействий; $u^n(\tau)$ – вектор управляющих воздействий; $x^n(\tau)$ – вектор входных параметров.

Запишем наблюдаемые параметры в виде преобразования:

$$Y(\tau) = \Phi[Z(\tau), X^n(\tau)] = \Phi[Z(\tau), x^n(\tau), w^n(\tau), u^n(\tau)], \quad (2)$$

где Y – вектор выходных параметров системы; Φ – закон отображения.

Многие закономерности процесса полирования успешно описываются в терминах приведенных операторов преобразования. Все микроявления, реализующиеся в технологической системе, протекают параллельно и обладают устойчивыми взаимосвязями.

Анализ характеристик полировальной ленты целесообразно проводить с учетом их поэтапного изменения от оборота к обороту. Такой подход позволяет перейти к дискретному представлению зависимостей (1) и (2):

$$\begin{aligned} Z_{i(j)} &= F[Z_{i-1(j-1)}, x^n_{i(j)}, w^n(\tau), u^n_{i(j)}], \\ Y_{i(j)} &= \Phi[Z_{i(j)}, x^n_{i(j)}, w^n(\tau), u^n_{i(j)}] \end{aligned} \quad (3)$$

Полученные операторы определяют состояние технологических подсистем с учетом входных и выходных характеристик, а также внешних возмущений. Задача проектирования

Изменение входных параметров уже на первом обороте при сохранении неизменными остальных переменных и изменения управляющих воздействий может привести к изменению параметров состояния во всех звеньях системы и выходных параметров на заключительном этапе выполнения операции.

$$\left. \begin{aligned} y_i^1 &= f_i^1(y_{i-1}, u_i(t), w_i(t)); \\ y_i^2 &= f_i^2(y_{i-1}, u_i(t), w_i(t)); \\ &\dots\dots\dots \\ y_i^k &= f_i^k(y_{i-1}, u_i(t), w_i(t)); \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

Система (4) определяет закон преобразования при производстве изделия в дискретной системе управления. Фазовые координаты состояния объекта после выполнения i -го оборота зависят от состояния объекта после $(i-1)$ -го оборота, выходных переменных, управляющего и возмущающего воздействий.

$$u_i(t) \in U_i[y(t-1)]. \quad (5)$$
$$\left. \begin{aligned} h_{\partial i} &= \Phi^1(h_{\partial i-1}, u_i, w_i, x_i) \\ R_{ai} &= \Phi^2(R_{i-1}, u_i, w_i, x_i) \\ T &= \Phi^3(T, u_i, w_i, x_i) \\ D_{\partial i} &= \Phi^4(D_{\partial i-1}, u_i, w_i, x_i) \\ \Pi_i &= \Phi^5(\Pi_{i-1}, u_i, w_i, x_i) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

P_i - высота припуска, оставшегося к i -му обороту.

Вектор параметров состояния $Z_{i(j)}$ для обеспечения качества изделий должен находиться в некоторой допустимой области: $Z_{i(j)} \leq Z_{\text{кр}i(j)}$.

Критическое значение вектора $Z_{kpi(j)}$ на любом обороте (проходе) определяют ограничения, которые состоят из технических требований к детали и инструменту, условиями протекания обработки и допустимыми режимами работы оборудования:

$$Z_{kpi(j)} = F[S_{i(j)}, Z_{don}, u_{don}^n] \quad (7)$$

Для характеристики критического значения вектора $Z_{kpi(j)}$ при ленточном полировании могут быть использованы, например, следующие ограничения:

$$\begin{aligned} h_{di} &\leq h_{don} + \Pi_i, \\ Ra_i &\leq Ra_{don} + \Pi_i, \\ &\dots\dots\dots, \\ 0 &\leq u^n \leq u_{don}^n, \end{aligned} \quad (8)$$

где u_{don}^n - максимально допустимые значения управляющих воздействий, генерируемых оборудованием.

Критерием эффективности при ленточном ротационном полировании может быть принято штучное время или приведенные затраты на полирование изделия [14].

В общем случае, критерий эффективности J может быть выражен в виде функционала [10,13]:

$$J = f_1^0(y_0, u_1(t)) + f_2^0(y_1, u_2(t)) + \dots + f_n^0(y_{n-1}, u_n(t)) + G_J = \sum_{n=1}^n y_n^0(y_{i-1}, u_i(t)) + G_J, \quad (9)$$

где f_i^0 - функция критерия эффективности на i -ой операции; G_J - постоянные расходы, не зависящие от условий выполнения операции.

В целом задача повышения эффективности технологического процесса шлифования может быть сформулирована следующим образом: зная начальное Y_0 и конечное Y_N состояния, выбрать такое допустимое управление U типа (5), которое придает функционалу (9) минимальное значение. Данная задача является задачей теории оптимального управления. Для её решения необходимо определить функционалы (4), (5) и (9) в виде зависимостей от технологических факторов, определяющих процесс формообразования поверхности при полировании.

При системном анализе процесса ленточного ротационного полирования ключевым элементом выступает зона контакта инструмента с заготовкой. Ее состояние характеризуется геометрическими параметрами, интенсивностью съема материала, скоростью съема материала, параметрами изнашивания и разрушения абразивного материала. Размеры зоны находятся в прямой взаимосвязи с состоянием поверхности, размерами и пространственным расположением полировальной ленты и заготовки. В связи с изменением размеров, пространственного расположения и состояния контактирующих поверхностей с течением времени будут изменяться параметры состояния зоны контакта и, как следствие – выходные показатели процесса [15,16].

Выводы. Проведенный системный анализ операции ленточного ротационного полирования позволил формализовать его как сложную многокомпонентную систему, функционирование которой определяется взаимодействием ключевых подсистем. Установлены взаимосвязи между их параметрами, что является основой для построения адекватных математических моделей. Определены ограничения и критерии эффективности, позволяющие перейти к решению задачи оптимального управления процессом. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку явных математических моделей подсистем и создание на их основе адаптивных систем управления, обеспечивающих стабильно высокое качество обработки при минимальных затратах.

Список литературы

1. Новоселов, Ю. К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Ч. 1. Состояние рабочей поверхности инструмента / Ю. К. Новоселов, А. В. Королев. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 60 с.
2. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. - К.: Наукова думка, 1979. - 244 с.
3. Масловский, В.В. Полирование металлов и сплавов / В.В. Масловский, П.Д. Дудко. – М.: Высшая школа, 1974. – 255 с.
4. Effect of Process Modes on Tangential Component of Cutting Force during Belt Rotary Grinding of Aluminium Alloy Blanks D 16 / T. Stadnik, D. Sidorov, P. Novikov, I. Temindarov // Materials Research Proceedings, Temryuk, 06–10 сентября 2021 года. – Temryuk, 2022. – P. 466-472.
5. New Calculation Methodology of the Operations Number of Cold Rolling Rolls Fine Grinding / S. Bratan, Z. Ságová, M. Sága [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Vol. 13, No. 6. – P. 3484.
6. Повышение производительности циклов шлифования валков холодной прокатки путем оптимизации режимов графоаналитическим методом / С. М. Братан, Ю. К. Новоселов, А. О. Харченко, С. И. Рошупкин // Черные металлы. – 2023. – № 12.
7. Братан, С. М. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки / С. М. Братан, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 57-70.
8. Моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем шлифовании хрупких неметаллических материалов / С. М. Братан, С. И. Рошупкин, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 31-39.
9. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П.Бусленко. – М.: Наука, 1975. – 400 с.
10. Кузнецов, Ю.Н. Теория технических систем / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцив – Севастополь: СевНТУ, 2010. – 252с.
11. Хубка, В. Теория технических систем / В. Хубка. – М.: Мир, 1987. – 208 с.
12. Якобс, Г.Ю. Оптимизация резания/ Г.Ю. Якобс, Э. Якоб, Д. Кохан. – М.: Машиностроение, 1987. – 279 с.
13. Болтянский, В. Г. Математические методы оптимального управления / В. Г. Болтянский – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1969. – 408 с.
14. Якимов, А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 174 с.
15. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.
16. Вожжов А.А. Процедуры формирования параметров качества при механической обработке деталей. / А.А. Вожжов, Д.В. Ярохина // Производственно-технический журнал «Главный механик». Москва: Панорама, 2020. – №9. – С. 17-23.

УДК 621.7

ПРИМЕНЕНИЯ 3D-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ВОССОЗДАНИЯ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

**Б.А. Репинский¹,
Д.С. Солнцева¹,
И.Р. Сущевский¹,
С.И. Рошчупкин¹**

¹Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются современные методы 3D-сканирования как эффективный инструмент решения задач машиностроительного производства, связанных с восстановлением и воссозданием геометрии деталей. Анализируются существующие технологии бесконтактных измерений, подробно останавливаясь на лазерном сканировании как оптимальном методе для промышленного применения.

Исследование демонстрирует практические аспекты использования 3D-сканирования на примерах различных типов деталей: корпусных, деталей вращения, лопаток турбин и крыльчаток.

Ключевые слова: импортозамещение, машиностроение, реверс-инжиниринг, судостроение, моделирование, 3D-сканирование, аддитивные технологии.

APPLICATIONS OF 3D SCANNING TO RECREATE THE GEOMETRY OF PARTS IN MECHANICAL ENGINEERING

**B.A. Repinsky¹,
D.S. Solntseva¹,
I.R. Sushchevsky¹,
S.I. Roshchupkin¹**

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

The article discusses modern 3D scanning methods as an effective tool for solving machine-building production problems related to the restoration and reconstruction of the geometry of parts. The existing technologies of contactless measurements are analyzed, focusing in detail on laser scanning as the optimal method for industrial applications. The study demonstrates the practical aspects of using 3D scanning using examples of various types of parts: body parts, rotating parts, turbine blades and impellers.

Keywords: import substitution, mechanical engineering, reverse engineering, shipbuilding, modeling, 3D scanning, additive technologies.

Введение. Современное машиностроительное производство сталкивается с проблемой поддержания работоспособности оборудования, для которого запасные части либо имеют длительные сроки поставки и высокую стоимость, либо совсем сняты с производства.

Особенно остро эта проблема стоит для уникального и устаревшего оборудования, техническая документация на которое может быть утеряна или недоступна [1].

Традиционные методы измерений с использованием механических инструментов (штангенциркули, микрометры, нутромеры) не обеспечивают необходимой гибкости при работе со сложнопрофильными поверхностями, а также не всегда позволяют в полной мере учитывать характер износа. В этих условиях технологии 3D-сканирования становятся оптимальным решением для быстрого и точного воссоздания геометрии изношенных деталей. Они позволяют при последующей доработке в САПР-системе получить цифровую модель физического объекта с высокой степенью детализации, что открывает возможности для последующего анализа, модификации и производства. Поскольку, контактные координатно-измерительные машины (КИМ), хотя и обладают высокой точностью, требуют значительных временных затрат. КИМ обеспечивают высокую точность измерений (до 0,001 мм), но имеют ограничения по скорости сбора данных и сложности измеряемых поверхностей. Они наиболее эффективны при работе с деталями простой геометрической формы.

Бесконтактные измерения лишены большинства этих недостатков. В данный момент самыми популярными методами получения 3D-сканов являются [2,8]:

1. Лазерное сканирование – основано на принципе триангуляции, обеспечивает точность до 0,01-0,05 мм и подходит для большинства промышленных деталей.
2. Структурированный свет – проецирует на объект световые шаблоны, анализ искажений которых позволяет восстановить 3D-геометрию с точностью до 0,03-0,1 мм.
3. Фотограмметрия – использует серию фотографий объекта с разных ракурсов для построения 3D-модели, обеспечивает точность до 0,05-0,2 мм в зависимости от размера объекта.
4. Компьютерная томография – позволяет получать информацию не только о внешней геометрии, но и о внутренней структуре объекта с точностью до 0,01-0,1 мм.

Остановимся подробнее на способе лазерного сканирования, который является оптимальным решением для задач машиностроения благодаря высокой точности и скорости получения данных. Как уточнялось выше, этот метод основан на принципе триангуляции, при котором лазерный луч направляется на поверхность объекта, а специальные датчики фиксируют отраженный сигнал, определяя координаты точек поверхности. К преимуществам лазерного сканирования относятся: возможность получения высокоточных моделей (погрешность до 0,01 мм), высокая скорость сбора данных, возможность сканирования объектов сложной геометрии, а также быстрая настройка без необходимости установки маркеров. Однако у данного метода есть и недостатки: высокая стоимость оборудования, сложности при сканировании прозрачных, зеркальных или сильно глянцевых поверхностей из-за особенностей отражения лазерного луча, а также необходимость в специальном программном обеспечении для обработки полученных облаков точек. Несмотря на эти ограничения, лазерное сканирование остается ведущим методом для получения трехмерных моделей в современном машиностроении [9-10].

Практические примеры. Стоит так же уточнить, что каждый тип изделий требует специфического подхода к процессу сканирования и последующей обработки полученных данных с учетом их геометрических особенностей и функционального назначения, даже при работе в рамках одного сканирующего устройства. Особое внимание стоит уделить методикам обеспечения точности при воссоздании критически важных элементов геометрии, выявлению и анализу возможных отклонений и дефектов, а также способам их корректировки при построении цифровых моделей. Рассмотренные примеры наглядно демонстрируют эффективность применения 3D-сканирования для решения практических задач инженерного проектирования.

1) При сканировании корпусных деталей первостепенное значение приобретает тщательная проработка базовых поверхностей и мест их сопряжения. Уделяется пристальное внимание сохранению соосности отверстий, их правильному взаимному расположению, а также строгому контролю плоскостности и параллельности опорных поверхностей [11].

Например, в ситуации, где уже существует корпус, в который необходимо установить дополнительные элементы, сканирование примыкающих поверхностей и скруглений значительно упрощает процесс построения прилегающих конструкций, позволяя создавать минимальные зазоры.

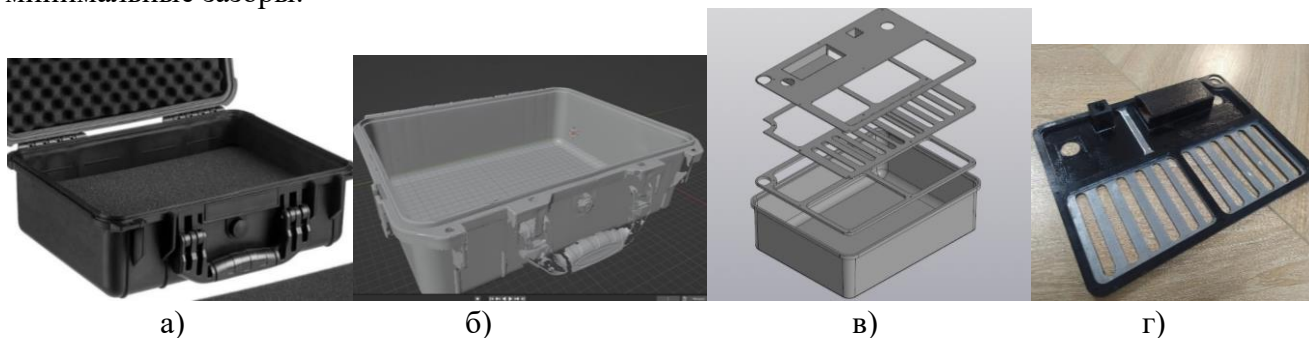


Рисунок 1. а)- существующая база, б)- скан поверхностей, в) – САПР-модель вкладыша, г)- вкладыш.

2) В случае деталей вращения основной задачей становится восстановление исходного профиля по имеющимся сечениям. Проводится детальный анализ биения и отклонений от цилиндричности, соосности и перпендикулярности торцовых поверхностей, оценивается радиальное и торцовое биение относительно базовой оси. Особое внимание уделяется выявлению характерных дефектов: овальности, огранки, конусообразности и бочкообразности, которые могут возникать вследствие биения шпинделя, изменения мгновенных центров вращения, несоосности оборудования или деформации при обработке. [12]

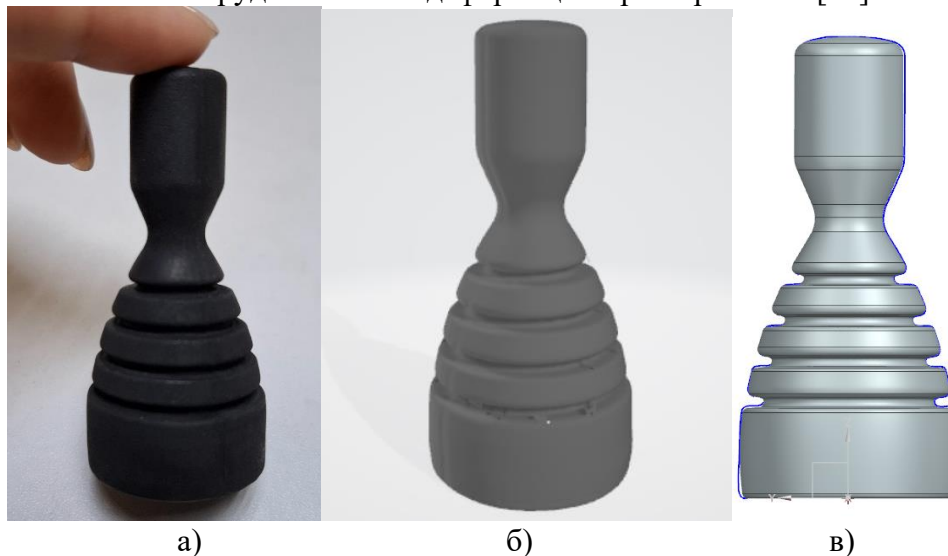


Рисунок 2. а) - образец, б) - скан, в) - САПР-модель

3) При работе с лопатками турбин и крыльчатками применяется комплексный подход, включающий использование методов симметрии для точного восстановления профиля. Для описания сложной геометрии используются сплайновые поверхности, что позволяет добиться максимальной точности. Завершающим этапом становится тщательный анализ

аэро/гидродинамических характеристик восстановленной геометрии, что гарантирует оптимальное функционирование детали в дальнейшем.

Для искривлённой поверхности не подходят традиционные измерительные приборы. Создать точки для привязки сплайна можно создать контактной КИМ, но гораздо быстрее и нагляднее с этим справится 3D-сканирование.

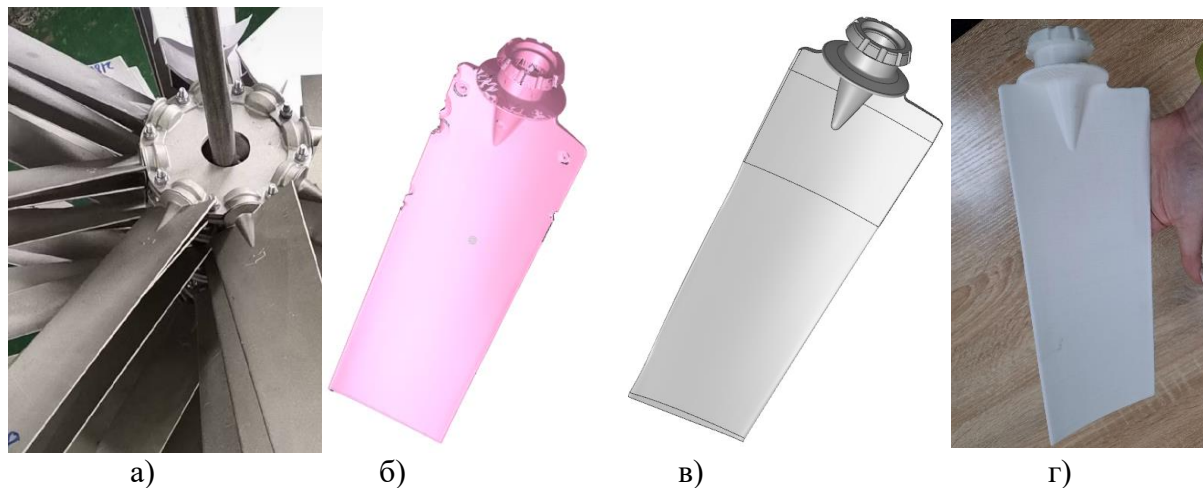


Рисунок 3. а) - образец, б) - скан, в) - САПР-модель, г) - копия.

Такой подход позволяет:

1. Сократить число этапов производства деталей
2. Снизить расходы на хранение физических прототипов
3. Организовать цифровой архив деталей для оперативного воспроизведения

Улучшить конструкцию деталей, учитывая обнаруженные эксплуатационные проблемы

Заключение. Данный подход позволяет не только восстанавливать оригинальную геометрию деталей, но и совершенствовать их конструкцию с учетом реальных условий эксплуатации. Это особенно важно для предприятий, эксплуатирующих уникальное или устаревшее оборудование, для которого затруднено или невозможно приобретение оригинальных запасных частей. Внедрение описанной модели в практику ремонтных и машиностроительных предприятий способствует сокращению времени простоя оборудования, снижению затрат на ремонт и повышению надежности восстановленных узлов.

Список литературы

1. https://www.profiz.ru/pb/blog/post_9670
2. Бушуев, В.В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие / В.В. Бушуев, А.А. Фомин. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 256 с.
3. Дмитриев, А.К. Методы и средства 3D-сканирования в машиностроении / А.К. Дмитриев, П.С. Орлов // Известия вузов. Машиностроение. – 2019. – № 5. – 45-53 с.
4. Лазарев, Н.П. Особенности 3D-сканирования сложнопровильных поверхностей / Н.П. Лазарев, В.Г. Петров // Вестник машиностроения. – 2018. – № 7. – С. 34-39 с.
5. Петров, А.А. Современные методы измерения геометрических параметров деталей / А.А. Петров // Научные технологии. – 2017. – Т. 18. – № 4. – С. 56-64 с.
6. Иванов С.С. Прочностной расчет наземной многофункциональной платформы / Иванов С.С., Вожжов А.А., Садыков В.Д. В сборнике: Современные технологии: проблемы и перспективы. сборник статей всероссийской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и молодых учёных. Севастополь, 2024. С. 263-265.

7. Чемпинский, Л.А. Методы и средства измерений / Л.А. Чемпинский. – Москва: Инфра-Инженерия, 2019. – 264 с
8. Zhang, Y. Advanced 3D Scanning Technologies for Precision Manufacturing / Y. Zhang, J. Wang // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2018. – Vol. 52. – P. 1-15
9. Хокинс, Б. Обратный инжиниринг: практическое руководство / Б. Хокинс. – Москва: ДМК Пресс, 2017. – 672 с.
10. Sherer, R. Reverse Engineering: Technology of Reinvention / R. Sherer // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. – Vol. 85. – No. 1-4. – P. 117-129.
11. Голованов, Н.Н. Геометрическое моделирование / Н.Н. Голованов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 472 с
12. Попов, Е.П. Теория и расчет гибких систем / Е.П. Попов. – Москва: Наука, 2018. – 280 с.

УДК 621.7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА В95

*А.А. Вожжов¹,
А.Г. Колесов¹,
М.И. Братан¹,
О.А. Бунин¹*

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена экспериментальному исследованию процесса внутреннего шлифования заготовок из сплава В95. Проведен анализ и выбран материал инструмента, выбраны режимы резания. Разработана управляющая программа внутреннего шлифования в системе ЧПУ Fagor. Описана методика наладки станка RSM M 500 CNC на обработку. Проведен эксперимент по шлифованию отверстий в заготовках из сплава В95 на различных режимах. Даны рекомендации по оптимальным режимам резания для обеспечения требуемой шероховатости обрабатываемой поверхности.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, управляющая программа, режимы резания, шероховатость.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INTERNAL GRINDING PROCESS OF B95 ALLOY WORKPIECES

*A.A. Vozhzhov¹,
A.G. Kolesov¹,
M.I. Bratan¹,
O.A. Bunin¹*

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

The article is devoted to the experimental study of the process of internal grinding of blanks made of B95 alloy. The analysis was carried out and the tool material was selected, and the cutting modes were chosen. A control program for internal grinding was developed in the Fagor CNC system. The method of setting up the RSM M 500 CNC machine for processing was described. An experiment was conducted on grinding holes in blanks made of B95 alloy at various modes. Recommendations were given on the optimal cutting modes to ensure the required roughness of the processed surface.

Keywords: internal grinding, control program, cutting modes, roughness.

Введение. Качество поверхности и функциональные характеристики изделий, определяющие их эксплуатационные свойства, достигаются на финишных операциях, включая внутреннее шлифование [1-15]. Формирование поверхности при шлифовании происходит за счет сложного взаимодействия шлифовального круга и заготовки, приводящего к одновременному протеканию множества случайных процессов съема материала. Для моделирования этих процессов применяется теоретико-вероятностный подход. Однако, существующие модели, предназначенные для определения радиального съема и толщины слоя с текущей шероховатостью, требуют обязательной экспериментальной верификации и адаптации режимов обработки, поскольку не учитывают влияние специфических параметров оборудования на процесс шлифования.

Целью исследования является выявление возможности обеспечения шероховатости $Ra0,08$ на финишной операции шлифования отверстия деталей из материала марки B95, необходимо произвести расчет параметров радиального съема материала и толщины слоя, формирующего текущую шероховатость в процессе шлифования. Исследовать процесс удаления частиц материала и провести анализ динамики изменения шероховатости поверхности в зоне контакта на каждом этапе шлифования.

Основная часть. Обработка точных отверстий – трудоемкий и сложный процесс, превосходящий по сложности обработку наружных поверхностей из-за более тяжелых условий и меньшей жесткости инструмента. Финишные операции, такие как внутреннее шлифование, играют решающую роль в определении эксплуатационных свойств и функциональности изделия. Шлифование – это процесс удаления материала, основанный на множестве случайных процессов, возникающих при контакте шлифовального круга и заготовки. Для моделирования шлифования часто применяют теоретико-вероятностные методы [2]. В работах А.Н. Резникова, О.Б. Федосеева, Н.И. Богомолова, Л.А. Глейзера, П.И. Ящерицына, Ю.Д. Аврутина, Д.Г. Евсеева, А.В. Королева, Ю.К. Новоселова и других авторов, приведены конкретные примеры получения расчетных зависимостей применительно к частным случаям и условиям шлифования использующих различные статистико-вероятностные методы. Показано, что любые выводы о количестве рабочих зерен, процентном соотношении их с зёрнами на поверхности круга могут иметь реальный смысл лишь применительно к конкретным присущим данному процессу условиям, что связано с нестационарностью операций шлифования [3].

Экспериментальные исследования процесса внутреннего шлифования заготовок из материала марки B95 проводились на шлифовальном станке RSM M 500 CNC. Проведен анализ и выбран материал инструмента – карбид кремния (зеленый) 64C 16x24x6 F600.



а)



б)

Рисунок 1. Экспериментальные исследования процесса шлифования заготовок из материала марки В95

а) общий вид шлифовального станка RSM М 500 CNC; б) инструмент из карбида кремния зеленого

После закрепления инструмента из карбида кремния зеленого в устройстве для внутреннего шлифования проводилась его правка алмазным карандашом методом обтачивания, закрепленным в специальном приспособлении (рисунок 2). Режимы правки: $V_k=13$ м/с, $t=0,025$ мм, $S=50$ мм/мин. Процесс продолжался до момента приобретения инструментом правильной формы, которая контролировалась специальным шаблоном.

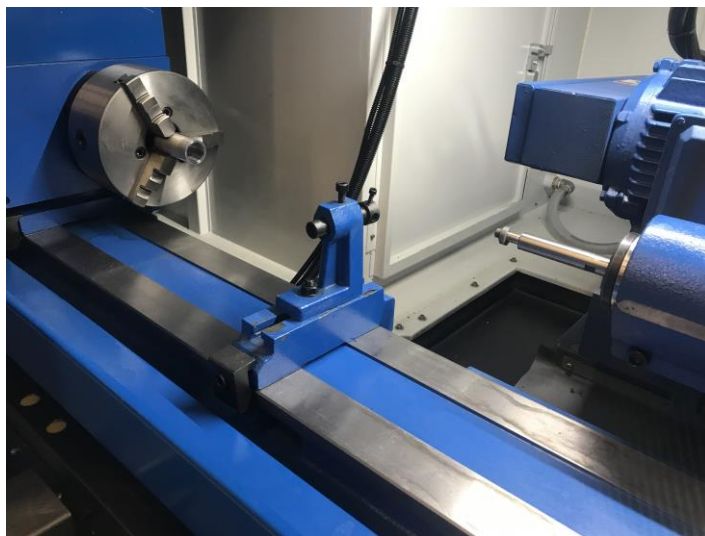


Рисунок 2. Приспособление для правки инструмента

Заготовка из материала марки В95 была предварительно расточена до диаметра 25.016 мм, после ее закрепления трехлачковом патроне проводилась процедура «привязки» инструмента и определение нулевой точки заготовки G55: вращающейся шлифовальной головкой $D_k=20$ мм осуществлялось касание цилиндрической поверхности заготовки в ручном режиме работы станка (JOG) – нулевая точка по оси X, а также торца детали – нулевая точка по оси Z. Данные смещения нулевой точки G55 заносились в таблицу коррекции.

Разработка управляющей программы осуществлялась с помощью панели ЧПУ системы Fagor с использованием внутришлифовального цикла (рисунок 3). Рассмотрим параметры

цикла «Внутренний проход»: $\varnothing$ – диаметр отверстия до шлифования, мм; X_r – диаметр после обработки, мм; Ost – припуск на шлифование, мм; x – глубина резания, мм; Fz – величина продольной подачи, мм/мин; RPM – частота вращения заготовки, об/мин; H – количество проходов выхаживания.

Режимы резания для процесса внутреннего шлифования заготовок из материала марки В95 назначались, руководствуясь нормативно-справочной литературой. Стоит отметить, что по скорости резания существует ограничение, так как частота вращения инструмента, закрепленного в устройстве для внутреннего шлифования станка, не регулируется и составляет – $n=15\,000$ об/мин. Для проведения экспериментальных исследований была подобрана СОТС – водосмешиваемый полусинтетический концентрат смазочно-охлаждающей жидкости AdvaCut AL2. Ее подача в зону обработки осуществлялась с помощью специальной трубки через отверстие трехкулачкового патрона и заготовки.

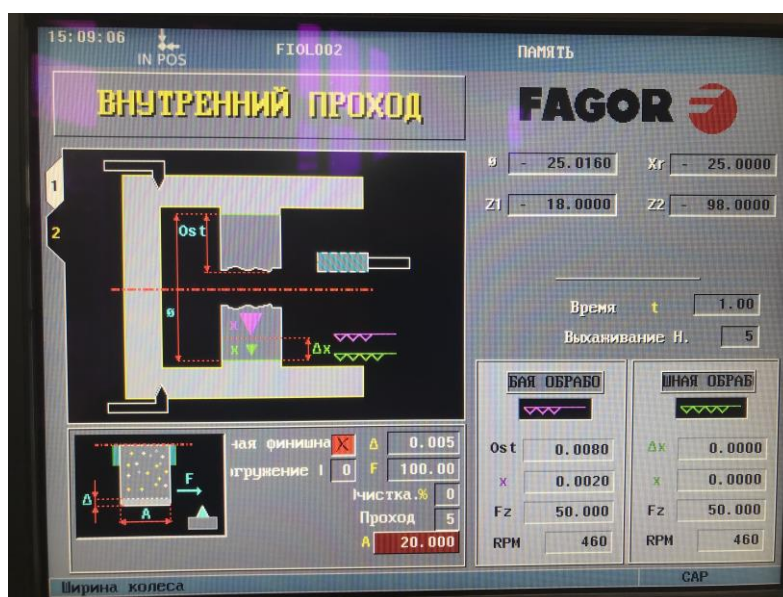


Рисунок 3. Внутришлифовальный цикл системы ЧПУ Fagor

После разработки управляющей программы осуществлялась ее проверка в режиме симуляции системы ЧПУ Fagor. Далее УП отработывалась в холостом режиме (обработка «по воздуху»).

При подготовке к экспериментальным исследованиям проведены исследования погрешности базирования заготовки, рассчитан припуск, удаляемый на операции. Предложено использовать циклы с тремя режимами в соответствии с проведенными расчетами [4,5].

В ходе эксперимента варьировали глубину резания t и величину продольной подачи S_{np} , а также количество проходов выхаживания.

Значение параметра шероховатости Ra контролировали с помощью профилометра после каждого цикла обработки, а размер отверстия – нутромером (рисунок 4).

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

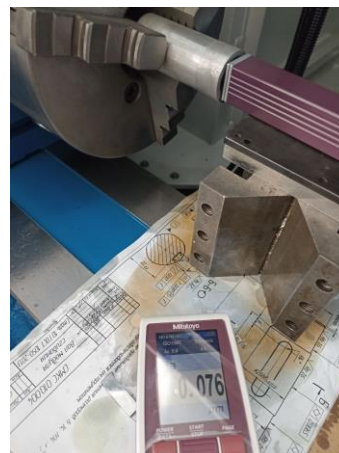


Рисунок 4. Измерение шероховатости поверхности обрабатываемой детали из материала марки В95

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований процесса внутреннего шлифования заготовок из материала марки В95.

№ п/п	Скорость резания, V_k , м/с	Частота вращения заготовки, n , об/мин	Продольная подача, $S_{пр}$, мм/мин	Глубина резания, t , мкм	Ra , мкм
1	13	460	30	5	0.174
2	13	460	30	3	0.156
3	13	460	30	1	0.092
4	13	460	50	2	0.142
5	13	460	30	2	0.110
6	13	460	10	2	0.076

Выводы. Важной для управления процессом шлифования является модель микроформообразования, связывающая параметр шероховатости с радиальной силой шлифования, приходящейся на единицу ширины зоны контакта круга с деталью. Эксперименты показали, что увеличение радиальной силы увеличивает показатель шероховатости Ra . Значительное влияние на шероховатость шлифованной поверхности оказывает скорость продольной подачи при правке круга, которая обуславливает не только начальное значение Ra сразу после правки, но и характер изменения шероховатости от времени работы круга. После правки в начале шлифования происходит «приработка» круга. Затем наступает второй период, характеризующийся стационарной работой с монотонным увеличением показателя шероховатости.

Для большинства режимов шлифования отклонение значений радиального съема и слоя с текущей шероховатостью материала, рассчитанных по упрощенным моделям, не превышает 7 %. Только для режимов с поперечной подачей – 23%, что может быть объяснено использованием стандартных циклов шлифования ЧПУ станка без учета износа инструмента. Таким образом, принятые приближения обеспечивают достаточно высокую точность расчетов и позволяют аналитически оценить влияние на радиальный съем материала и слой с текущей шероховатостью поверхности элементов режима шлифования и характеристик абразивного

инструмента. Радиальный съем и слой с текущей шероховатостью поверхности зависят от фактической глубины микрорезания, скорости заготовки, размеров заготовки и круга, геометрии абразивного зерна, числа режущих кромок на поверхности круга.

Список литературы

1. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. - Севастополь: СевНТУ, 2012. - 304 с. - ISBN 978-617-612-051-3
2. A time-domain surface grinding model for dynamic simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monn // *Procedia CIRP*. - 2012. - Vol. 4. - P. 166-171. - DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.030
3. Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface / J. Jung, P. Kim, H. Kim, J. Seok // *Simulation Modelling Practice and Theory*. - 2015. - Vol. 57. - P. 88-99. - DOI: 10.1016/j.simpat.2015.06.005
4. Братан, С. М. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки / С. М. Братан, А. С. Часовитина // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 57-70. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70.
5. Братан, С. М. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию / Братан С.М., Головин В.И., Новоселов Ю.К., Дымченко И.А. *Научные технологии в машиностроении*. 2023. № 10 (148). С. 30-38.
6. Pokintelitsa N. Calculation of contact tensions in the process of thermofrictional treatment / Pokintelitsa N., Levchenko E. В сборнике: 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Conference proceedings. Sochi, Russia, 2021. С. 353-361.
7. Bogutsky V.B. Analysis of existing approaches for describing the parameters of single sections during grinding / Bogutsky V.B., Shron L.B., Yagyaev E.E. В сборнике: *Journal of Physics: Conference Series*. Сер. "International Scientific Practical Conference Materials Science, Shape-Generating Technologies and Equipment 2021, ICMSTE 2021" 2021. С. 012026.
8. Rybalkin E. Three-dimensional integro-differential model of unstationary hydrodynamic process in a liquid-metal pool of underwater arc welding / Rybalkin E., Yagyaev E., Bogutsky V., Shron L. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Т. 2131. № 2. С. 022027.
9. Братан С.М. Моделирование влияния относительных вибраций инструмента и заготовки на съем материала при внутреннем шлифовании / Братан С.М., Часовитина А.С. *Научные технологии в машиностроении*. 2022. № 9 (135). С. 3-9.
10. Хекерт Е.В. Влияние внешних факторов на технологическую систему высокоточного станка в условиях плавучих мастерских / Хекерт Е.В., Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О. *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. № 2-4 (52). С. 33-37.
11. Bratan S. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloys / Bratan S., Stadnik T., Golovin V. В сборнике: *Materials Today: Proceedings*. 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020. Elsevier Ltd, 2021. С. 2013-2018.
12. Bratan S. New calculation methodology of the operations number of cold rolling rolls fine grinding / Bratan S., Ságová Z., Sága M., Yakimovich B., Kuric I. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. Т. 13. № 6. С. 3484.

13. Братан С.М. Моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем шлифовании хрупких неметаллических материалов / Братан С.М., Рощупкин С.И., Харченко А.О., Часовитина А.С. Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23. № 2. С. 31-39.

14. Братан С.М. Вероятностная модель удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов / Братан С.М., Рощупкин С.И., Харченко А.О., Часовитина А.С. Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23. № 2. С. 6-16.

15. Effect of Process Modes on Tangential Component of Cutting Force during Belt Rotary Grinding of Aluminium Alloy Blanks D 16 / T. Stadnik, D. Sidorov, P. Novikov, I. Temindarov // Materials Research Proceedings, Temryuk, 06–10 сентября 2021 года. – Temryuk, 2022. – P. 466-472.

УДК 621.7

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

*А.Е. Графова¹,
Д.В.Петров¹,
А.В.Харитонов¹,
Д.А. Юрьев¹,*

¹Севастопольский государственный университет, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

В работе осуществлен анализ методов прецизионной обработки полупроводниковых слитков на пластины дисками, указаны преимущества и выявлены недостатки существующих методов обработки. Выполнен анализ методик расчета показателей процесса резки, который показал, что существуют модели процесса шлифования хрупких материалов учитывающие наличие процессов механического резания и хрупкого объемного разрушения материала, которые учитывают стохастическое взаимодействие абразивных зерен с материалом заготовки. Такой подход к оценке влияния режимов на качество поверхности целесообразно применить и при изучении процессов резки, что позволит выявить преимущественное влияние на качество обработки определенного режимного фактора и на этой основе разработать мероприятия по повышению производительности процесса резки

Ключевые слова: шлифование, полупроводниковые пластины, диски с внутренней режущей кромкой, режимы резки.

ANALYSIS OF RESEARCH ON PRECISION CUTTING OF INGOTS INTO PLATES WITH DISCS WITH AN INTERNAL CUTTING EDGE

*A.E. Grafova¹,
D.V. Petrov¹,
A.V. Kharitonov¹,
D.A. Yuryev¹,*

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

This paper analyzes methods for precision machining of semiconductor ingots into wafers using disks, highlighting the advantages and identifying the shortcomings of existing machining methods. An analysis of methods for calculating cutting process parameters revealed that models for grinding brittle materials exist that take into account mechanical cutting processes and brittle volumetric fracture of the material, as well as the stochastic interaction of abrasive grains with the workpiece material. This approach to assessing the impact of machining conditions on surface quality is also appropriate for studying cutting processes, allowing for the identification of the predominant influence of a particular machining condition on machining quality and, based on this, the development of measures to improve cutting productivity.

Keywords: grinding, semiconductor wafers, internal cutting-edge discs, cutting modes.

Введение. В настоящее время уделено повышению эффективности механической обработки кремния, германия, арсенида галлия, ферритов и других хрупких и сверхтвёрдых материалов. Этому вопросу посвящён ряд работ советских и зарубежных учёных [1... 5].

Фундаментальные положения обеспечения качества в теории шлифования освещены в исследованиях: Аврутина Ю.Д., Анельчика В.Д., Байкалова А.В., Бакуля В.Н., Беззубенко Н.К., Богомолова Н.И., Бокучава Г.В., Братана С.М., Гавриша А.П., Гусева В.В., Доброскока В.Л., Евсеева Л.Г., Кальченко В.И., Кузнецова Ю.Н., Королева А.В., Корчака С.Н., Лавриненко С.Н., Лебедева Г.В., Лоладзе Т.Н., Лурье Г.Б., Маталина А.А., Маслова Е.Н., Новоселова Ю.К., Островского В.И., Петракова Ю.В., Подураева В.Н., Попова С.А., Редько С.Г., Резникова А.Н., Рыжова Э.В., Саютина Г.И., Сизого Ю.А., Узуняна М.Д., Федоровича В.А., Федосеева О.Б., Филимонова Л.Н., Худобина Л.В., Якимова А.В. и многих других. [6...25].

Представленные работы освещают широкий спектр проблем, возникающий при чистовом и тонком шлифовании, посвящены созданию технологических процессов, обеспечивающих качественную обработку деталей, позволяют решать комплекс задач направленных на существенное повышение производительности обработки, уменьшение себестоимости производства изделий, улучшение качества выпускаемой продукции, а также повышение культуры производства и безопасности труда. В них показана необходимость дальнейшего повышения производительности финишной обработки, что возможно за счет комплексной механизации и автоматизации всех производственных процессов, однако четких рекомендаций применительно к станкам по разрезке полупроводниковых материалов в этих исследованиях не представлено.

Анализ существующей литературы показывает на существенную роль технологической наследственности при механической обработке полупроводниковых материалов значительно, которая влияет на эффективность всего технологического процесса и эксплуатационные характеристики изготовленных изделий [6...8]. Развитие современного машиностроения немыслимо без непрерывного поиска новых технологических решений, разработок и исследований.

Предварительные исследования точностных параметров станка и отрезаемых пластин показали, что они могут принимать любые значения в пределах допуска и являются случайными величинами. Связь между точностными параметрами станка и отрезаемыми пластинами корреляционная, так как кроме рассмотренных параметров на точность отрезаемых пластин влияет большое число неучтенных факторов [9].

Особые свойства полупроводниковых материалов (хрупкость, высокая твердость) [10]. обуславливают необходимость создания для разрезки слитков на пластины специального оборудования, а рассмотренные работы отражают лишь общий подход и для конкретного

случая не приемлемы. Поэтому назрела необходимость тщательно исследовать процесс прецизионной резки.

Механической обработке полупроводниковых материалов посвящён ряд работ А.П. Гавриша [11]. На основании анализа экспериментальных исследований им установлено, что с уменьшением числа оборотов шпинделя с 16000 до 8000 об/мин увеличивается шероховатость поверхности деталей в среднем на 20% и почти вдвое – глубина трещиноватого слоя, что объясняется увеличением сечения среза и сил резания. С уменьшением зернистости с 40/28 мкм до 7/5 мкм улучшаются качественные характеристики поверхности детали и уменьшается глубина трещиноватого слоя. На основании математической обработки экспериментальных данных А.П. Гавриш получил зависимость глубины трещиноватого слоя

$$F = 4000 \frac{D^{0,626} \cdot t^{0,568}}{n^{0,732} \cdot N^{0,500}}, \quad (1.1)$$

где D – зернистость шлифовального круга; n – число оборотов шпинделя; N – число оборотов стола; t – вертикальная подача.

Полученные результаты исследований были легли в основу по определению шероховатости и глубины нарушенного слоя при разрезании полупроводниковых материалов [12].

Определенный вклад в исследование процесса разрезания кремния и германия принадлежит А.Г. Патратьеву, который впервые обосновал преимущество разрезания слитков на пластины дисками с внутренней режущей кромкой и особое внимание уделил вопросам рационального использования дорогостоящего материала, упорядочению технологических процессов, снижению себестоимости изготовления кристаллов. А.Г. Патратьев глубоко и всесторонне изучил влияние подачи на шероховатость поверхности пластин. На основании анализа своих исследований А.Г. Патратьев рекомендовал производить резку полупроводниковых материалов при подачи не превышающей 15-20 м/мин. Эти рекомендации были получены применительно к разрезанию полупроводниковых слитков диаметром 10-30 мм. В настоящее время промышленность освоила выращивание слитков диаметром до 500 мм. Поэтому использование вышеуказанных рекомендаций, полученных А.Г. Патратьевым свыше 40 лет назад, не соответствует современным требованиям достижения максимальной производительности процесса. Это выдвигает задачу оптимизации выбора подач и проведения углубленных исследований влияния подачи на шероховатость поверхности с одновременным обеспечением необходимых уровней производительности процесса резки.

В современном производстве существует несколько методов резания полупроводниковых материалов с использованием абразивов [13]. Эти методы классифицируются в зависимости от способа использования абразивного материала. До недавнего времени широко использовались способы резания слитков с помощью стальных полотен [14].

Недостатками являются возможность увода проволоки в сторону при резке на большую глубину и сложность эксплуатации станка (например, заправка проволоки при обрыве требует определенных навыков и занимает много времени).

Ультразвуковая резка полупроводниковых материалов также ведется с применением абразивной суспензии, которая подается под режущую кромку инструмента. Торец инструмента помещается на небольшом расстоянии от обрабатываемой поверхности, необходимом для создания акустического контакта. Достоинствами резки при помощи ультразвука является возможность делать вырезки любых конфигураций. Недостатком является трудность получения глубоких прорезей ввиду сильной разбивки ширины прорезки за счет кавитации на боковых поверхностях инструмента [20].

Наиболее широкое применение среди различных методов резания в последнее время нашли методы резания полупроводниковых материалов вращающимися алмазными дисками. Существует два вида отрезных дисков: диски с внешней режущей кромкой и диски с внутренней режущей кромкой. В качестве основы используют листовую бронзу или нержавеющую сталь. Достоинствами резки алмазными кругами с внешней режущей кромкой является относительно высокая производительность (20-30 мм/мин). К недостаткам резки этим методом следует отнести большой процент отходов разрезаемого дорогостоящего материала (при большом диаметре разрезаемых слитков) и высокую стоимость дисков с алмазной крошкой [20].

Наиболее широкое применение в производстве полупроводниковых приборов нашел метод резки монокристаллов кремния на пластины при помощи алмазного диска с внутренней режущей кромкой, при установке которого крепление производится с помощью двух зажимных колец и стягивающих винтов. Диск вместе с кольцами устанавливается на оправку, ось вращения которой совпадает с осью вращения диска. Степень натяжения диска можно регулировать с помощью стягивающих болтов. Вращение диска, установленного в барабан производится со скоростью 3000-5000 об/мин. В процессе резания разрезаемый материал подается к вращающемуся диску. Относительное перемещение отрезного диска и разрезаемого материала должно быть строго стабилизированным. Отклонения в настройке станка совместно с неточностью изготовления его элементов вызывают дефекты поверхности и геометрической формы отрезаемых пластин, увеличивают глубину наружного слоя.

Достоинством разрезания слитков на пластины диском с внутренней режущей кромкой является более высокая производительность – в 2-3 раза больше по сравнению с другими методами разрезания и выше качество обработки, а также наименьшая ширина пропила дорогостоящего материала, примерно на 60% меньше, чем дисками с внешней режущей кромкой и в 2 раза – чем при остальных способах резания. Основа диска имеет значительно меньшую толщину, так как жесткость диска обеспечена особым способом крепления (рис. 1-9), что позволяет уменьшить вибрации и получить чистоту обработанной поверхности выше, чем другими видами резки [18].

В работах зарубежных авторов [20-22] записаны практические рекомендации по выбору режимов резания с целью повышения стойкости инструмента.

В указанных работах нет четких указаний о преимущественном влиянии каких-либо из факторов режимов резания на качество поверхности и стойкости инструмента, определяющую производительность процесса, то есть рассматриваются частные вопросы, не исследуя взаимодействия всего комплекса операций, что не позволяет оптимизировать технологический процесс.

Всё это приводит к выводу о необходимости подробного теоретического и экспериментального исследования влияния на качество поверхности полупроводниковых материалов после разрезки основных режимных факторов в отдельности, а также комплексном совокупном взаимодействии.

В работе С.С. Ерошина исследованы и теоретически обоснованы рекомендации по набору оптимального предварительного натяжения отрезного диска типа АКВР и установлено его значительное влияние на процесс разрезания и неплоскостность отрезаемых пластин. Получены уравнения:

$$Y_1 = 11,57 + 0,11x_1 + 0,62x_3 + 0,49x_3 - 0,02x_7 + 0,17x_9$$

$$Y_2 = 297,53 - 19,59x_3 + 1,06x_2 + 55,89x_8 - 4,18x_9$$

из которых следует, что неплоскостность отрезаемых пластин увеличивается по мере износа инструмента, увеличения диаметра разрезаемого слитка и радиального биения режущей

кромки и уменьшается при увеличении натяжения инструмента, уменьшении радиального биения и подачи.

Исследованы силовые зависимости по методу Бокса-Уилсона и определено их влияние на напряженное состояние корпуса алмазного инструмента. Рассчитана жесткость АКВР в зависимости от его натяжения и толщины и установлено, что

$$j = 2\pi qh \frac{J_1}{L^2},$$

т.е. жесткость прямо пропорциональна натяжению инструмента и его толщине. J и L – параметры, зависящие от величины относительного отверстия АКВР.

В работе К.Пёшель, Х. Хофман, Х. Зейфарт . [16] приведена оценка работоспособности алмазных кругов с внутренней режущей кромкой.

В процессе резания участвуют не все алмазные зерна, что приводит к высокой ударной нагрузке на инструмент и слиток. Всё это характерно для данной технологии обработки кремния даже при отцентрированных дисках. Таким образом, крепление и натяжение диска имеет значение для формирования требуемого уровня качества поверхности и это необходимо учитывать при проведении комплексных исследований. Исследованиями установлено, что отклонение от плоскости при измерительном усилии прибора 8 г алмазоносный слой отрезного диска прогибается до 8 мкм в осевом направлении барабана. В торцевой части барабана прогиб диска доходит до 40 мкм. Чередование минимума и максимума характерны для материала корпуса и называется его анизотропией. Более мелкие отклонения вызваны чередованием винтов натягивания и закрепления круга, что является следствием недостаточной жесткости натяжных колец. Измерение по радиусам показывает, что круг прогибается во внутрь барабана плоскость реза отклоняется от направления подачи. Значительный прогиб круга вызывает прогиб пластины, который превосходит допустимые отклонения.

Данные исследования подтверждают целесообразность ввода в технологический процесс плавно-изменяющихся по определенному закону режимов резания.

В работе К.Пёшель, Х. Хофман, Х. Зейфарт приводятся исследования режущих свойств алмазного слоя, так называемый «метод вращающегося кристалла». Существенные отличия этого метода от известных заключаются в следующем:– вследствие одновременного вращения алмазного круга и кристалла глубина резания составляет только половину диаметра кристалла;– алмазоносный слой, кроме резания, выполняет функцию сглаживания обработанных поверхностей; – повышается стабильность направления резания.

При варьировании скорости вращения кристалла по величине и направлению возможны изменения процесса резания в широких пределах, т.е. можно получать незначительную длину контакта алмазоносного слоя с кристаллом, если скорость вращения кристалла достаточно велика, что приводит к лучшим условиям удаления стружки и к увеличению удельной нагрузки алмазным слоем. Особенность метода состоит в том, что к скорости и подаче, заданной станком, добавляется дополнительная компонента, которая позволяет изменять локальную нагрузку на алмазоносный слой в зависимости от оборотов кристалла, не нагружая материал корпуса выше его предела прочности.

Анализ этой группы работ позволяет сделать вывод о существенном влиянии на качество поверхности при резке таких режимных факторов как скорость и подача. Учитывая противоречивость данных (в некоторых источниках отмечается незначительное влияние скорости [20]. необходимо для разработки конкретных рекомендаций промышленности тщательно изучить количественно значения степени влияния отдельных режимов резания на параметры качества поверхности полупроводниковых пластин.

На основании анализа литературных источников в области шлифования можно установить общие закономерности с процессом разрезания. Так в работах Г.Ф. Скрипки рассматривается влияние режимных факторов на величину силы резания. На основании этих исследований установлено, что при шлифовании силы резания увеличиваются за счёт увеличения числа алмазных зёрен, участвующих в работе в единицу времени. По-видимому, и при разрезании с увеличением подачи детали в зону резания, сила резания будет увеличиваться за счёт увеличения количества режущих зёрен и толщины срезаемого слоя. Этот вывод необходимо подтвердить экспериментальной проверкой.

В работе В.М. Пачевского, Ю.М. Данилова, В.М. Родинова приведена методика исследования влияния режимных параметров при шлифовании на основные показатели процесса, такие как шероховатость поверхности, производительность процесса шлифования, удельный расход алмаза, радиальную и тангенциальную составляющие силы резания, применительно к операциям калибровки слитков кремния: шлифование производилось алмазными кругами 200x10x3 АСВ 100/80 МІ – 100% при различных режимах: скорость круга 18...40 м/сек, окружная скорость вращения детали $V_d = 30...70$ м/мин, подача на оборот детали $S_o = 2...5$ мм/об, глубина шлифования на ход стола станка $t = 0,01...0,03$ мм/ход [20].

В работах А.В. Хандожко в основу положен метод полного факторного эксперимента, позволяющий количественно оценить влияние параметров режимов резания на показатели процесса шлифования кремния и получить высокую точность эмпирических зависимостей.

Для упрощения последующих расчётов параметры режимов шлифования закодированы по формулам преобразования, имеющим вид:

$$x_i = \frac{2(\ln z_{cp} - \ln z_{\max})}{\ln z_{\max} - \ln z_{\min}} + 1,$$

где x_i – кодовое обозначение i -того параметра режима резания; $Z_{\max}$, $Z_{\min}$, Z_{cp} – максимальное, минимальное и среднее значение i -того параметра режима резания соответственно.

Анализ исследований даёт возможность судить о влиянии того или иного параметра на процесс шлифования. На силу резания наибольшее влияние оказывает глубина шлифования. Резание с глубиной 0,03 мм/ход приводит к резкому увеличению силы резания.

В работах Ю.К., Новоселова А.В. Королева, С.М. Братана приведены расчеты и модели процесса шлифования хрупких материалов при наличии процессов механического резания и хрупкого объемного разрушения материала с учетом стохастического взаимодействия абразивных зерен с материалом заготовки. Они разработали фундаментальную теорию процессов чистовой и отделочной обработки [14].

Выводы. Указанный ими подход к оценке влияния режимов на качество поверхности получены применительно к исследованию процесса шлифования, целесообразно применить и при изучении процессов резки, что позволит выявить преимущественное влияние на качество обработки определенного режимного фактора и на этой основе разработать мероприятия по повышению производительности процесса резки.

Список литературы

1. Братан, С. М. Моделирование взаимосвязей между входными факторами и выходными показателями процесса внутреннего шлифования с учетом взаимных колебаний инструмента и заготовки / С. М. Братан, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 57- 70. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.1-57-70. – EDN FABVJD.

2. Якубов, Ч. Ф. Моделирование процессов теплопередачи при термофрикционном резании в заготовках из конструкционных сталей / Ч. Ф. Якубов, Н. И. Покинтелица, С. М. Братан, А. С. Часовитина // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 10 (160). – С. 19-26. – EDN: IFYZFM.
3. Покинтелица, Н. И. Повышение качества обработки на операциях термофрикционного резания за счет оптимальной стохастической диагностики и управления съемом припуска / Н. И. Покинтелица, С. М. Братан, А. С. Часовитина, Ч. Ф. Якубов // Научные технологии в машиностроении. – 2025. – № 8 (170). – С. 21-30. – EDN: IMWABP DOI: 10.30987/2223-4608-2025-8-21-30
4. Братан, С. М. Повышение качества термофрикционной обработки путем введения в технологическую систему дополнительных динамических демпфирующих приспособлений / С.М. Братан С.М., Н.И. Покинтелица Н.И., А.О. Харченко А.О., Ч.Ф. Якубов // Черные металлы. – 2023. – № 12. – С.16. EDN: EKDHKJ.
5. Bratan, S. New calculation methodology of the operations number of cold rolling rolls fine grinding S.Bratan, Z.Ságová, M.Sága, B.Yakimovich, I.Kuric // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Т. 13. – № 6. – С. 3484. – EDN: FKSDBY.
6. Братан, С. М. Моделирование влияния относительных вибраций инструмента и заготовки на съем материала при внутреннем шлифовании / С. М. Братан, А. С. Часовитина // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 9(135). – С. 3-9. – DOI 10.30987/2223-4608-2022-9-3-9. – EDN ZCQLCF.
7. Братан С. М. Вероятностная модель удаления поверхностного слоя при шлифовании хрупких неметаллических материалов / С. М. Братан, С. И. Рошупкин, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 6-16. – DOI 10.17212/1994- 6309-2021-23.2-6-16. – EDN NYYZXL.
8. Братан С. М. Моделирование съема припуска в зоне контакта при внутреннем шлифовании хрупких неметаллических материалов / Братан, С. И. Рошупкин, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 31-39. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-31-39. – EDN SHFFWW.
9. Хекерт Е.В. Влияние внешних факторов на технологическую систему высокоточного станка в условиях плавающих мастерских / Е.В. Хекерт, Е.А. Владецкая, С.М. Братан, Харченко А.О. // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-4 (52). – С. 33-37. – EDN: XEPDCY.
10. Bratan S. Evaluation of effectiveness of cutting fluids for belt grinding of long-length products of titanium alloy/ S. Bratan, T.Stadnik, V.Golovin //Materials Today: Proceedings. 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020. Elsevier Ltd, 2021. С. 2013-2018.
11. Bratan, S. The mathematical models of electrochemical grinding for the precision production / S. Bratan, I. Kuric, B. Yakimovich, U. Abdulgazis, D. Abdulgazis // MM Science Journal. – 2024. – Т. 2024. – № 6. – EDN: MHXDSN – DOI: 10.17973/mmsj.2024_12_2024100.
12. Братан, С. М. Повышение производительности циклов шлифования валков холодной прокатки путем оптимизации режимов графоаналитическим методом / С.М. Братан, Ю.К. Новоселов, А.О. Харченко, С.И. Рошупкин // Черные металлы. – 2023. – № 12. –С.15. –EDN: JYXOP.
13. Братан, С.М. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию / С.М. Братан С.М., В.И.

Головин, Ю.К. Новоселов, И.А. Дымченко // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2023. – № 10 (148). – С. 30-38. – EDN: ROPDFE.

14. Братан С. М. Влияние на вероятность удаления материала относительных вибраций абразивного инструмента и заготовки при чистовом шлифовании / С. М. Братан, С. И. Рошупкин, А. С. Часовитина, К. Гупта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 33-47. – DOI 10.17212/1994-6309-2022-24.1-33-47. – EDN FGQKDO.

15. Братан, С. М. Вычисление радиального съема материала и толщины слоя с текущей шероховатостью при шлифовании хрупких неметаллических материалов / С. М. Братан, С. И. Рошупкин, А. О. Харченко, А. С. Часовитина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 31-44. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.3-31-44. – EDN OCMCPW.

16. Bratan, S. The correlation of movements in the technological system during grinding precise holes / S. Bratan, S. Roshchupkin, A. Chasovitina // Materials Science Forum. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 384-389. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.384. – EDN SDIQRE.

17. Bratan S.M. Quality improvement of manufacturing rolling mill rolls / Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Kharchenko A.O., Belousov S.V. // CIS Iron and Steel Review. – 2021. – Т. 22. – С. 26-31. – EDN: PWDYSB.

18. Elekert E.V. Influence of external factors on the technological system of a high-precision machine tool in conditions of floating workshops / Elekert E.V., Vladetskaya E.A., Bratan S.M., Kharchenko A.O. // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – Т. 4. – № 2 (53). – С.33.

19. Stadnik T. Effect of process modes on tangential component of cutting force during belt rotary grinding of aluminium alloy blanks D 16 / Stadnik T., Sidorov D., Novikov P., Temindarov I. В сборнике: Materials Research Proceedings. Сер. "Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment" 2022. – С. 466-472. – EDN: DFDVYT.

20. Meng, J. Cutting hard-brittle materials with endless electroplated diamond wire saw / J. Meng, Y. Han, P. Ge // Diamond & Abrasive Engineering. - 2007. - № 3. - P. 86-93.

21. Egemen, T. Mechanics of Wire Saw Machining Process: Experimental Analyses and Modeling / T. Egemen - Ames, Iowa. - 2008. - 137 p.

22. Ge, P.Q. Study on Electroplated Diamond Wire Saw Development and Wire Saw Wear Analysis / P.Q. Ge, Y.F. Gao, S.J. Li, Z.J. Hou // Key Engineering Materials - 2009. -Vol. 416. - P. 311-3.

23. Боран-Кешишьян, А.Л. Реакция на произвольный сигнал динамической системы виброизолирующего устройства станка в условиях плавучей мастерской / А.Л. Боран-Кешишьян, С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 1-1 (59). – С. 81-85. – EDN: GCBWXY.

24. Bratan S. Investigation of the mechanism of interaction of cutting fluids with the material of the workpiece when grinding titanium parts in the presence of inorganic salt / S. Bratan, T. Stadnik, S. Roshchupkin // Materials Today: Proceedings. 2020 International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2020, ICMTMTE 2020. Elsevier Ltd, 2021. – С. 2048-2051. – EDN: DFDVYT.

25. Владецкая Е.А. Динамика вибрационных воздействий на шлифовальный станок в условиях плавучей мастерской с учетом морского волнения / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.В. Хекерт // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – № 3-1 (57). – С. 84-94. – EDN: VFUMYG.

УДК 62-523.8

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ПОДНАЛАДКИ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Д.А. Черепанин¹,
А.А. Макамутдинова¹,
В.Б. Богуцкий¹

¹Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается этап кибернетизации управления технологическими процессами с использованием электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Описывается переход от традиционной жёсткой автоматизации, основанной на простых операциях с обратной связью и заранее заданной математической моделью, к современным адаптивным системам, способным автоматически изменять параметры управления при внешних возмущениях. Особое внимание уделено применению конечных автоматов как модели адаптивного управления, обладающих свойствами, схожими с живыми системами, что связано с особенностями термодинамики и управлением энтропией. В итоге подчёркивается значимость интеллектуальных кибернетических систем для эффективного управления сложными и динамичными производственными процессами.

Ключевые слова: Адаптивные системы, конечные автоматы, механическая обработка, управление технологическими процессами, интеллектуальные системы, термодинамика.

SYSTEM ANALYSIS OF AUTOMATIC CONTROL AND ADJUSTMENT BASED ON AN EVOLUTIONARY MODEL

D. A. Cherepanin¹,
A. A. Makamutdinova¹,
V. B. Bogutsky¹

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

ABSTRACT

This article examines the cybernetization of technological process control using computers. This article describes the transition from traditional hard automation, based on simple feedback operations and a predefined mathematical model, to modern adaptive systems capable of automatically changing control parameters in response to external disturbances. Particular attention is paid to the use of finite automata as a model of adaptive control, possessing properties similar to those of living systems, due to the properties of thermodynamics and entropy management. Ultimately, the importance of intelligent cybernetic systems for the effective management of complex and dynamic production processes is emphasized.

Keywords: Adaptive systems, finite automata, machining, process control, intelligent systems, thermodynamics.

Введение. Современное промышленное производство стоит на пороге нового технологического уклада, определяемого переходом от автоматизации к интеллектуализации

технологических процессов. Традиционные системы автоматического управления, основанные на принципах жёсткой детерминированности и априорно заданных алгоритмах, успешно решают задачи в условиях стабильной, предсказуемой производственной среды. Однако их фундаментальное ограничение проявляется при столкновении с реальными возмущающими факторами: прогрессирующим износом инструмента, тепловыми и упругими деформациями, переменными свойствами обрабатываемого материала. Эти факторы носят стохастический и часто непредсказуемый характер, что приводит к неизбежной деградации качества продукции, росту брака и снижению общей эффективности производства [2].

Существующие адаптивные системы, несмотря на свою продвинутость, часто оказываются «адаптивными» лишь в рамках узкого коридора предусмотренных разработчиком ситуаций. Их реакции запрограммированы, а значит, в конечном счёте, ограничены. В условиях быстро меняющихся требований к продукции и самим производственным системам возникает насущная потребность в принципиально новом классе систем управления, способных не просто реагировать на изменения, но и самостоятельно эволюционировать, находить новые оптимальные стратегии и проявлять свойства, аналогичные живым системам: самообучение, самоорганизацию и самовоспроизведение.

Предлагаемый подход представляет собой принципиально новое направление в построении систем автоматического контроля и подналадки, основанное на эволюционной парадигме. В отличие от классических адаптивных систем с жёсткой архитектурой, в данной модели управление осуществляется популяцией конечных автоматов, проходящих непрерывный цикл эволюционного развития. Механизмы селекции, кроссинговера и мутации, применяемые к формализованному представлению управляющих стратегий («геному» автоматов), обеспечивают формирование Emergent Intelligence (возникающего интеллекта) на системном уровне. Такой подход позволяет не только адаптироваться к известным возмущениям, но и вырабатывать эффективные стратегии управления в условиях непредсказуемых изменений технологической среды, что открывает новые перспективы для создания устойчивых и автономных систем механообработки следующего поколения.

С появлением ЭВМ [1] в области управления и обработки информации начался этап кибернетизации трудовых функций человека, относящиеся к человеческой интеллектуальной деятельности. Для традиционной автоматизации основополагающим является принцип простой обратной связи.

На схеме (рисунок 1) приведена функциональная структура системы автоматического управления с простой обратной связью.

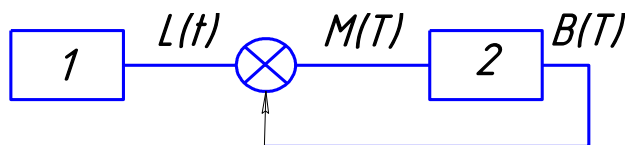


Рисунок 1. Схема функциональной структуры системы автоматического управления. 1 - задающее устройство; 2 - объект управления; $L(T)$ - задающее воздействие; $B(T)$ - управляемая величина; $Y(T)$ - возмущающее воздействие; $M(T)$ - управляющее воздействие.

Применительно к рассматриваемой системе автоматического контроля и подналадки в технологических процессах механообработки принятые в схеме обозначения имеют следующее содержание: 1 - устройство числового программного управления; 2 - технологическая система; $L(T)$ - кадры управляющей программы на обработку детали; $B(T)$ -

Фактические размеры обрабатываемой детали; $Y(T)$ - износ инструмента, упругие, тепловые деформации и пр.; $M(T)$ - кадры управляющей программы с учетом кадров коррекции.

Данная система управления соответствует концепции жесткой автоматизация. При этом в процессе функционирования система выполняет лишь простые операции над сигналами (сравнение сигналов, их несложные функциональные преобразования). Существенным является факт априорно определяемого характера этих операций.

Современные технологические процессы механообработки характеризуются возрастающей сложностью и жесткими требованиями к точности. При этом они протекают в условиях нестабильной производственной среды, где действуют многочисленные возмущающие факторы: интенсивный износ режущего инструмента, температурные деформации оборудования, неоднородность механических свойств материала заготовки и другие. Классические системы автоматизации [5], основанные на принципе жестко детерминированного управления, оказываются неспособными компенсировать эти непредсказуемые изменения, что приводит к потерям точности, увеличению брака и снижению общей эффективности производства.

Возникает принципиальная проблема: как обеспечить стабильное качество продукции в условиях непрерывно изменяющихся параметров технологической системы? Частичным решением являются системы активного контроля, требующие постоянного вмешательства оператора, или адаптивные системы с жесткими алгоритмами подналадки, эффективность которых ограничена рамками их программной реализации. Однако для создания truly гибких и устойчивых производственных комплексов необходим переход к принципиально новому классу систем, способных к самообучению и эволюционному развитию в процессе функционирования.

Современный этап кибернетизации управления и обработки информации определяется расширением и углублением трех центральных идей, высказанных Винером [7]:

- механизмы обратной связи являются существенной особенностью управления любой системы, независимо от ее природы и принципа действия;
- информация есть новое свойство материальных объектов, на базе которого реализуется целесообразное функционирование как технических, так и живых систем;
- управляющие устройства (ЭВМ) обладают рядом присущих человеку свойств, аналогичных мышлению, самоорганизации, развитию.

Основной особенностью данных систем является наличие ЭВМ, способной выполнять роль не простого устройства управления, а реализовывать функции анализа, синтеза и даже прогноза будущего состояния системы. Это позволяет автоматизировать сложные производственные процессы с большим количеством регулируемых параметров, быстрым протеканием по времени, изменяющимися стратегиями управления, сложным комбинированием принципов управления [1,6].

Особенностью жестких систем автоматизации является исходное предопределение о возможности создания адекватной математической модели объекта автоматизации и существование алгоритма, позволяющего на основе свойств модели реализовать целенаправленное воздействие на объект [4].

При управлении технологическими процессами в реальных условиях внешние возмущения иногда приводят к необходимости изменения параметров системы управления, в противном случае это может привести не только к количественным ошибкам или к ухудшению других показателей качества системы, но, зачастую, и к полной потере ее работоспособности.

Системы автоматически изменяющие значения своих параметров или структур при непредвиденных изменениях внешних условий на основании анализа состояния или поведения системы так, чтобы сохранить заданное качество работы называют адаптивными системами.

Эволюционная модель адаптивного управления предполагает в данной работе использование в качестве прототипа организма конечного автомата с приданием последнему некоторых признаков, свойств присущих живым организмам и системам.

Управление технологическими процессами механообработки с помощью конечных автоматов предполагает в качестве внешней среды совокупность действующих возмущающих факторов, приводящих к изменению технологического состояния системы, в частности, размеров обрабатываемой детали.

Рассмотрим вопрос, в какой мере конечный автомат можно интерпретировать как живую систему.

Основное различие между миром живого и неживого проявляется в действии второго закона термодинамики, выражающим статистическую тенденцию природы к беспорядку, тенденцию к выравниванию и таким образом обесценивание энергии в изолированных системах, что обычно выражается как возрастание в них энтропии. В противоположность этому в организмах не только происходит нарастание энтропии, но даже возможно ее уменьшение.

Поэтому для решения поставленной задачи управления технологическими процессами с помощью конечных автоматов, наделенных изначально случайным или априорным "интеллектом", основной является поиск такого пути развития для автоматов, который вел бы их к росту организованности в смысле адекватности реализованных в автоматах алгоритмов управляемому объекту, что имеет аналогию в природе как состояние подвижного равновесия со средой организма как живой целостной системы.

Однако, в отличие от биологической эволюции, длящейся миллионы лет, эволюция искусственных автоматов должна быть целенаправленной и высокоскоростной. Ключевым механизмом, обеспечивающим такую направленную адаптацию, является целевая функция (функция приспособленности), выступающая аналогом давления естественного отбора. Эта функция количественно оценивает эффективность каждого автомата в популяции, вычисляя интегральный показатель качества управления. Например, такая функция может минимизировать среднеквадратичное отклонение фактических размеров детали от номинала, учитывать скорость стабилизации технологического процесса после возмущения или балансировать между точностью и ресурсом инструмента.

Таким образом, в процессе непрерывного взаимодействия со средой (технологической системой) «выживают» и получают право на «размножение» те автоматы, которые демонстрируют наименьшее значение ошибки — то есть наиболее адекватно отражают изменения состояния объекта управления и вырабатывают оптимальные корректирующие воздействия. Этот целеориентированный отбор превращает случайный или априорный «интеллект» автоматов в структурированную и эффективную стратегию, обеспечивая то самое «подвижное равновесие» между системой управления и изменчивыми условиями её работы.

Второе. Живая система - это динамическое высокоподвижное целое, воспроизводящее и обновляющее свои компоненты посредством взаимодействия со средой.

Следовательно, конечные автоматы в целях приспособления к постоянно изменяющейся среде должны постоянно воспроизводить себя с обновлением своих компонентов.

Третье. Живая целостность системы, и в этом ее существенное отличие от неживого целого, есть система самоуправляющаяся, то есть обладающая внутренним свойством приспосабливаться к условиям постоянно изменяющейся среды.

Из самоуправляемого характера живой системы вытекает и такой ее существенный признак, как наличие особой формы всеобщей взаимосвязи материальных объектов - информации. Для живых систем наибольшее значение имеет передача наследственной (генетической) информации.

Аналогичная система передачи генетической информации должна существовать и для конечных автоматов для решения задачи самосохранения, самовоспроизведения, передачи и закрепления наиболее ценных признаков и свойств.

Практическую реализацию этой биологической аналогии обеспечивают эволюционные алгоритмы, где «хромосомой» автомата выступает структура данных, кодирующая его поведенческую стратегию. Такой «геном» может включать в себя правила переходов между состояниями, таблицы выходных сигналов, коэффициенты корректирующих воздействий или даже архитектурные параметры самого автомата. В отличие от статичного программного кода жесткой системы, эта хромосома представляет собой динамическую сущность, подверженную целенаправленному изменению.

На каждом цикле эволюции — например, после обработки контрольной партии деталей или при фиксации выхода параметров за допустимые пределы — запускается механизм искусственного отбора. Наиболее приспособленные особи-автоматы, показавшие наилучшие значения целевой функции, получают право на «размножение». Процесс «скрещивания» (кроссовера) позволяет потомству унаследовать фрагменты «хромосом» от разных успешных «родителей», комбинируя проверенные решения. Дополнительно оператор «мутации» целенаправленно вносит в популяцию случайные вариации, нарушая прямую наследственность. Это критически важно для преодоления локальных оптимумов и открытия принципиально новых, не заложенных изначально стратегий управления, позволяя системе адаптироваться к совершенно непредвиденным возмущениям.

Четвертое. Одним из основных признаков живых существ является их способность образовывать коалиции, при этом объединении живые существа способны совершить то, чего каждое из них в отдельности никогда бы не смогло бы достичь. В более точных терминах это означает, что коалиция подчиняется правилу сверхаддитивного нелинейного сложения при котором некоторая функция целого больше, чем сумма функций его частей.

Таким образом для решения поставленной задачи - построения алгоритма (выведения автомата), адекватного управляемому объекту, необходимо автоматы объединить в популяцию, в рамках которой автоматы могут развиваться, эволюционировать в непрерывном контакте с внешней средой [3].

Важно подчеркнуть фундаментальное ограничение: отдельный автомат, сколь бы сложной ни была его структура, не способен к полноценной эволюции и преодолению принципиально новых вызовов. Его внутренняя логика, будучи однажды заданной, конечна и предопределена. Он может оптимально функционировать в рамках тех условий, на которые был рассчитан, но не способен к радикальной перестройке своей сущности при столкновении с непредвиденными обстоятельствами.

Подлинная адаптивность и способность к развитию возникают не на уровне отдельной особи, а на мета-уровне — уровне популяции как целостной суперсистемы. Именно здесь реализуется непрерывный эволюционный цикл: масштабное тестирование множества поведенческих стратегий → объективный отбор наиболее эффективных → комбинирование их лучших признаков → генерация принципиально новых вариантов. Популяция в целом обладает тем коллективным «интеллектом» и адаптационным потенциалом, которого лишена любая из её изолированных частей.

Выводы. Выполненный анализ позволяет преодолеть ключевое противоречие между необходимостью детерминированного управления в каждый конкретный момент и

требованием фундаментальной изменчивости системы в долгосрочной перспективе. В каждый момент времени технологическим процессом управляет конкретный, детерминированный автомат, обеспечивая стабильность и предсказуемость. Но во времени сама функция управления эволюционирует, так как популяция в целом непрерывно обучается и перестраивается, порождая все более адекватные варианты управляющих воздействий.

Технологическая система и популяция конечных автоматов, непрерывно отражающая любые изменения во внешней среде, представляет в результате модель живой природы, в рамках которой условием выживания особей (конечных автоматов), является адекватное отражение ими изменения состояния технологической системы.

Список литературы

1. Цилькер Б. Я. Организация ЭВМ и систем. Б. Я. Цилькер, С.А. Орлов. СПб.: Питер, 2006. – 668 с.
2. Sima D. Advanced computer architectures. D. Sima, T. Fountain, P. Kacsuk. New York: Addison Wesley Longman Inc., 1997. – 766 p.
3. Колмогоров А. Н. Введение в теорию конечных автоматов и формальных языков. А. Н. Колмогоров, Ю. И. Манин. М.: Наука, 1977. – 305 с.
4. Заде Л. А. Системный анализ и управление. М.: Наука, 1985 – 124 с.
5. Богуцкий Б.В. Сравнительный анализ возможностей двух CAD-сред Inventor и Компас 3D. Б.В. Богуцкий, Братан С.М., Богуцкий В.Б. 2016 – 151-155 с.
6. Kailath T. Linear Systems. Prentice-Hall, 1980 – 712 с.
7. Винер Н. Кибернетика и общество. Пер. и редакция. Е. Г. Панфилова, Э. Я. Кольмана Н. Винер. Москва, 1958. – 204 с.

РАЗДЕЛ II МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.785.54

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ И ГЛУБИНУ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЗОНЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*Д.Г. Сергеев,¹
Д.В. Остальцева,¹
Е.А. Маринин,¹
Р.Ю. Некрасов²*

¹*Вятский Государственный университет, г. Киров, Российская Федерация*

²*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Российская Федерация*

STUDY OF THE INFLUENCE OF LASER PULSE HARDENING PARAMETERS ON THE HARDNESS AND DEPTH OF THE MODIFIED AREA WHEN PROCESSING CUTTING TOOLS

*D.G. Sergeev¹,
D.V. Ostalceva¹,
E.A. Marinin¹,
R.Y. Nekrasov²*

¹*Vyatka State University, Kirov, Russian Federation*

²*Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation*

АННОТАЦИЯ

В настоящее время целесообразным является поиск путей интенсификации технологий упрочнения инструмента. Одним из наиболее приоритетных способов является лазерная обработка (модификация) поверхности. Целью данной работы является установление взаимосвязи параметров импульсного лазерного излучения с параметрами упрочненного слоя, такими как твердость и глубина. В качестве образцов использовались фрагменты ленточных пил. Результатом исследования выступают математические модели связи параметров отклика и параметров импульсного лазерного излучения. Установлены факторы, оказывающее главное влияние на параметры отклика. Определены режимы импульсного лазерного излучения, позволяющие сформировать на поверхности ленточных пил области с наиболее эффективными физико-механическими свойствами. Это будет способствовать повышению уровня управляемости процесса лазерной модификации и получения стабильных результатов.

В рамках исследования использовалась модель полного факторного эксперимента. С помощью указанного метода исследуется процесс повышения физико-механических параметров режущих инструментов ленточнопильных станков с помощью лазерной обработки. В статье представлены результаты исследования лазерного упрочнения поверхностных слоев деревообрабатывающих пил из стали 9ХС. Результатом проведенных исследований является подтверждение и описание статистической взаимосвязи между режимами лазерной обработки (частота следования импульсов и сила тока накачки) с глубиной и твердостью упрочненного

слоя. С помощью статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели поверхностей отклика. Область применения полученных математических моделей – прогнозирование величины параметров отклика, полученных в результате использования различных режимов лазерного упрочнения, выбор оптимальных технологических параметров обработки.

Ключевые слова: ленточная пила, лазерная модификация, твердость, микроструктура, корреляция, факторы

ABSTRACT

Nowadays, it is reasonable to search for ways of intensifying tool hardening technologies. One of the most priority methods is laser treatment (modification) of the surface.

The aim of this work is to find the connection of the parameters of pulsed laser radiation and the characteristics of the hardened layer (hardness and depth of hardening) at the samples of band saws. To achieve the aim of the study, we found mathematical models of the connection of reaction parameters (hardening depth (h), hardness (HV)) and technological modes of pulsed laser radiation. The factors having the main influence on the reaction parameters were found. The modes of pulsed laser radiation were determined; they helped to form areas with the most effective physical and mechanical properties on the surface of band saws. It will help to increase the controllability of the laser modification process and get stable results.

A model of a complete factorial experiment is used in the study. The process of increasing the physical and mechanical parameters of band saw cutting tools using laser processing is studied with this method. The paper shows the results of a study of laser hardening of surface layers of woodworking saws made of 9XC steel. The influence of the technological modes parameters of laser hardening (pulse repetition frequency and current strength) on the depth and hardness of the hardened layer was established during the experimental studies. Mathematical models of reaction surfaces were made with the help of statistical processing of experimental data. The field of use of these models is the prediction of the value of the reaction parameters as a result of using various laser hardening modes and the choice of optimal technological parameters for treatment.

Key words: band saw, laser modification, hardness, microstructure, correlation, factors.

Введение. В большинстве случаев разрешение деталей и машин начинается с поверхности. По этой причине в настоящее время активно используются и разрабатываются технологические приемы повышения качества поверхности. К таким методам относятся различные методы интенсификации классической химико-термической обработки (17, 32) электрофизические методы (23), термогидрохимические (30) и многие другие (37). В целом подобным приемам становится свойственным учет синергетического эффекта, как и для машиностроения в целом (30).

В деревообрабатывающей промышленности широко используются ленточнопильные станки. Режущим инструментом данных станков являются ленточные пилы.

Разные физико-механические свойства различных пород древесины усложняют процесс резания (34). Качество обработанной поверхности и производительность процесса большей частью зависят от износостойкости пилы. Твердость поверхности пилы должна обеспечивать высокую стойкость при работе с твердыми материалами (34). Поэтому возникает необходимость в повышении стойкости ленточных пил.

Не все методы упрочнения являются оптимальными и экономичными. Одним из наиболее предпочтительных является метод лазерной обработки (26, 27, 33). Лазер как технологический инструмент модифицирования поверхности используется в огромном количестве разнообразных операций, среди которых закалка поверхности (6, 26), наплавка и легирование (37), модифицирование (1, 20), нанесение CVD-покрытий (10) и многих других. При этом следует отметить, что эффекта удается достигать на самых разнообразных материалах: титановых сплавах (7), алюминиевых сплавах (19), керамике и стеклах (9, 12), различных высокопрочных мартенситостареющих (8), инструментальных быстрорежущих (13, 21), легированных (16) сталях, и даже на жаропрочных сплавах (14). В некоторых случаях, кроме механических свойств поверхности, улучшается также коррозионная стойкость (15, 18).

Таким образом лазерная обработка при правильно подобранных режимах позволяет повысить прочностные показатели пил и создать инструмент с заранее заданными свойствами, соответствующими условиям эксплуатации режущего инструмента (29, 36).

Лазерное упрочнение имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с другими методами поверхностного модифицирования:

- отсутствует необходимость специальной подготовки поверхности обработки;
- незначительная глубина упрочнения, которая не приводит к хрупкости изделия в целом;
- отсутствие температурных деформаций;
- простота технологического процесса (4, 24, 25).

Именно этими причинами объясняется актуальность изучения влияния режимов импульсного лазерного излучения (частоту следования импульсов и силу тока накачки) на параметры отклика и их взаимного влияния на глубину и твердость упрочненного слоя (2, 3, 5). Целью данной работы является установление взаимосвязи параметров импульсного лазерного излучения с параметрами упрочненного слоя, такими как твердость и глубина. В качестве образцов использовались фрагменты ленточных пил. Результатом исследования выступают математические модели связи параметров отклика и параметров импульсного лазерного излучения. Установлены факторы, оказывающее главное влияние на параметры отклика. Определены режимы импульсного лазерного излучения, позволяющие сформировать на поверхности ленточных пил области с наиболее эффективными физико-механическими свойствами.

Методика. Эксперименты проводились по лазерному модифицированию деревообрабатывающих пил из легированной инструментальной стали 9ХС, с исходной твердостью 543 HV и толщиной детали 1 мм. Этот класс сплавов характеризуется повышенной упругостью и износоустойчивостью. Рассматриваемый материал применяется для создания режущих инструментов (28, 31).

Лазерное модифицирование поверхности производилось на твердотельном импульсном лазере TST-W200.

Результаты. Для установления взаимосвязи режимов лазерного излучения с твердостью и глубиной закаленного слоя и выбора оптимальной области исследования был проведен первый этап эксперимента упрочнения заготовки пилы с различными параметрами процесса закалки. Исследуемые технологические параметры лазерного излучения – частота лазерного воздействия (в Гц) и ток, подаваемый на лампу накачки (в А). В качестве откликов системы выбраны Глубина h , мм упрочненно-модифицированного слоя и твердость, измеряемая по Виккерсу HV, обработанной поверхности. Режимы и полученные зависимые переменные указаны в таблице 1.

Таблица 1. Режимы обработки первого этапа эксперимента

№	Частота лазерного воздействия, Гц	Ток накачки, А	Скорость перемещения пятна нагрева, мм/мин	Длительность импульса, с	Диаметр лазерного пятна, мм	Упрочненная глубина, мкм	Твердость упрочненной зоны HV
1	2	150	120	8×10 ⁻³	2	30	777
2	4	200	120		2	110	826
3	6	230	120		2	180	680
4	8	240	120		2	-	656

При режиме № 4 произошел перегрев детали и изменение структуры материала (рисунок 1) на полную толщину пилы. Данные изменения могут привести к увеличению хрупкости изделия.

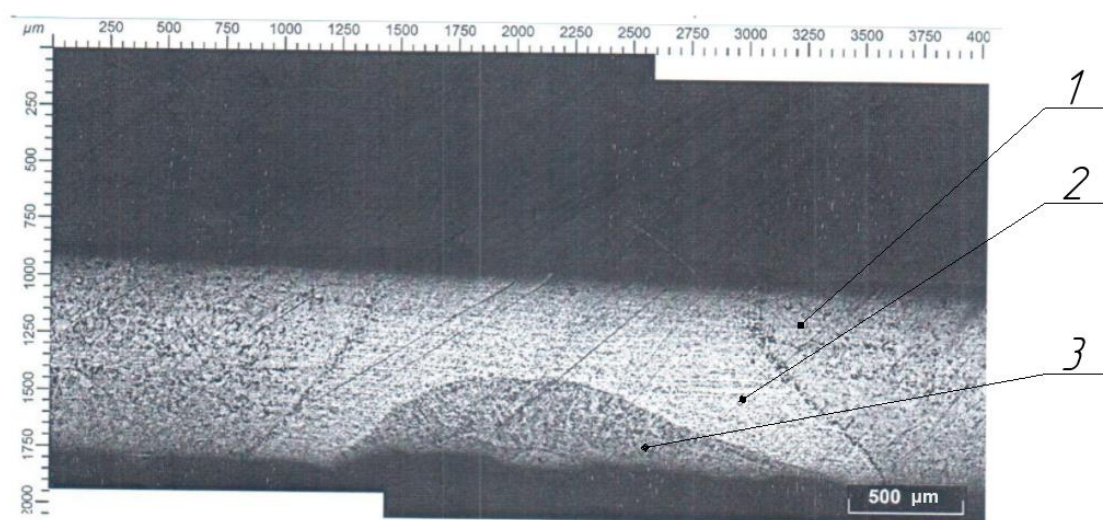


Рисунок 1. Металлографический анализ зоны лазерного упрочнения при режиме № 4:
1 – Деталь; 2 – Зона термического влияния; 3 – Зона лазерного воздействия

На данном этапе исследования оптимальные результаты были получены при режиме №2. Он позволил получить максимальную твердость поверхности при средней глубине упрочненной зоны. Данный режим взят за основу области полнофакторного эксперимента (35). Металлографический анализ упрочненной зоны при режиме № 2 показан на рисунке 2.

Поисковые исследования подтвердили предварительную гипотезу о взаимосвязи физико-механических свойств с параметрами упрочняющей лазерной обработки (22). Вторым этапом исследований, направленным на определение оптимальных значений технологических режимов лазерной обработки, являлся полный факторный эксперимент.

Создание математических моделей для параметров отклика системы (глубина и твердость), в которых в качестве факторов, влияние которых подтверждено экспериментально, используются параметры импульсного лазерного излучения, обеспечивает главную функцию моделирования – управление технологическим процессом. Это необходимо для воспроизводимого получения качественных изделий.

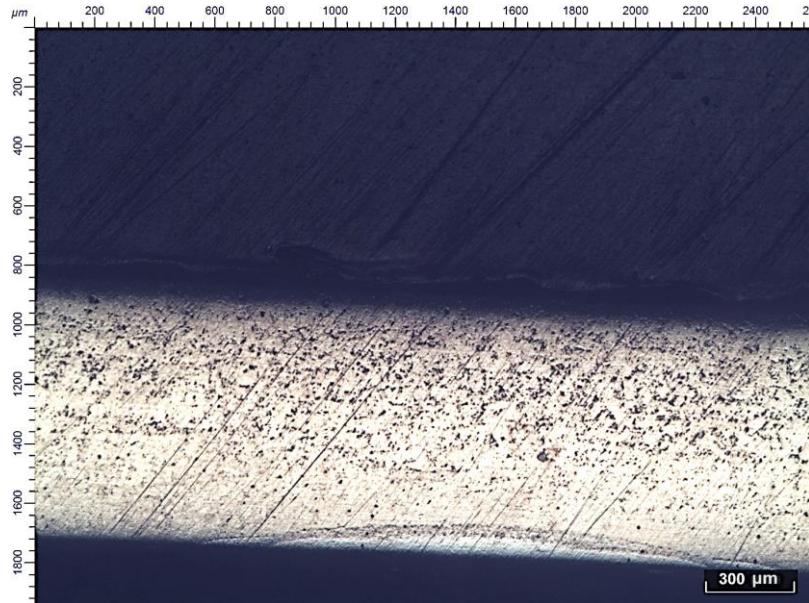


Рисунок 2. Металлографический анализ упрочненной зоны при режиме №2

Для создания математических моделей параметров отклика (Толщины h , мм упрочненной зоны и Твердости HV, HV поверхностного упрочненного слоя) от режимов лазерного модифицирования проведен двухфакторный трехуровневый эксперимент. Для этого изменялась Сила тока, подаваемого на лампу накачки I , А и Частота лазерного воздействия, Гц. Значения рассматриваемых технологических параметров в абсолютном и стандартизированном масштабе представлены в табл. 2. Дополнительные параметры, влияние которых не устанавливалось: диаметр сфокусированного лазерного излучения – 2 мм, скорость перемещения – 120 мм/мин, длительность импульса лазерного излучения - 8×10^{-3} с. Для исключения систематических ошибок опыты проводились в трехкратной последовательности. Последовательность режимов в каждом из опытов выбралось с помощью таблицы случайных чисел. Твердость (рисунок 3) измерялась на твердомере ТВМ 1000. Значение твердости упрочненных зон вычислялось как среднее арифметическое по результатам трех замеров. Толщина слоя (рисунок 4) измерялась на приборе для микроскопических исследований Neophot-21. Обработка результатов экспериментальных данных проведена в программе STATISTICA (38).

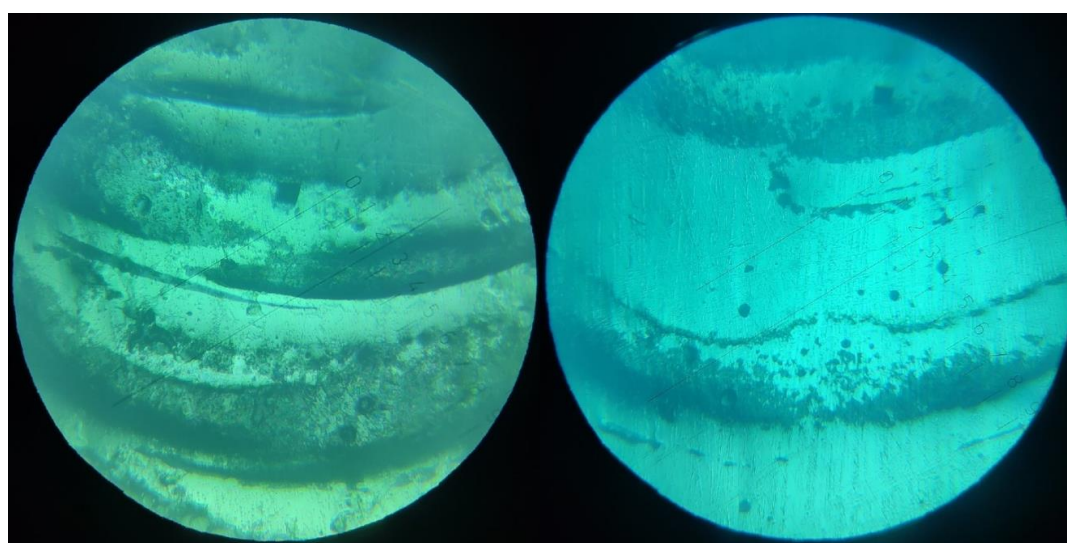
Таблица 2. Варьируемые факторы эксперимента

Наименование фактора	Обозначение	Кодированное обозначение	Уровни рассматриваемого фактора					
			Нижний у		Нулевой (средний)		Верхний	
			Натуральное	Кодированное	Натуральное	Кодированное	Натуральное	Кодированное
Сила тока	I	X1	150	-1	190	0	230	+1
Частота лазерного воздействия	f	X2	2	-1	4	0	6	+1

Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

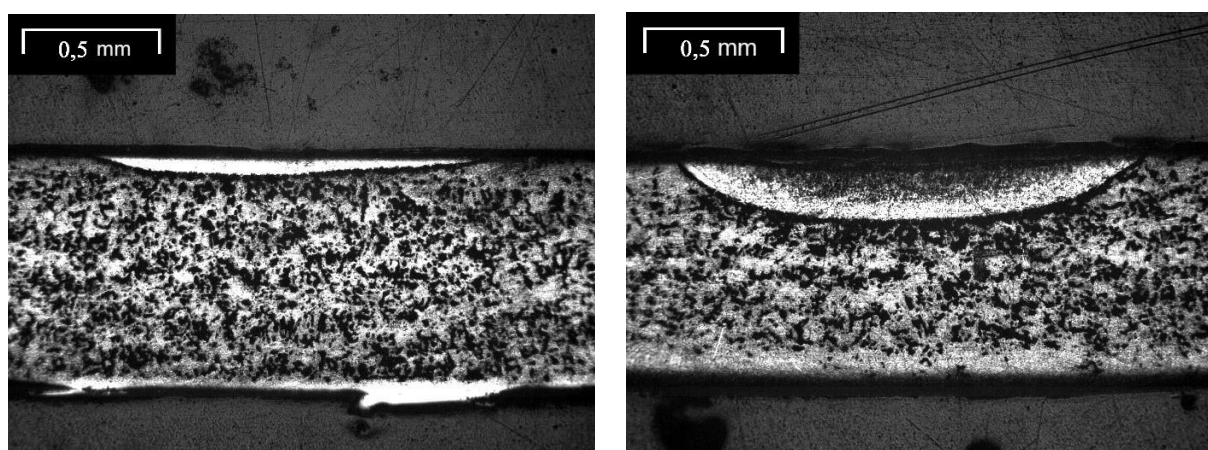
Таблица 2 - Результаты экспериментальных исследований

Абсолютные и стандартизированные значения					Параметры отклика системы	
№ опыта	X1	I, А	X2	f, Гц	h, мм	HV, HV
1	–1	150	–1	2	0,1	790
2	0	190	–1	2	0,146	824
3	+1	230	–1	2	0,139	774
4	–1	150	0	4	0,159	717
5	0	190	0	4	0,15	754
6	+1	230	0	4	0,188	758
7	–1	150	+1	6	0,169	702
8	0	190	+1	6	0,236	668
9	+1	230	+1	6	0,208	651



а б

Рисунок 3. Результат поверхностного упрочнения: а – опыт № 9 (минимальное значение твердости поверхности), б – опыт №2 (максимальное значение твердости поверхности)



а б

Рисунок 4. Глубина упрочненной области: а – опыт №1 (минимальное значение), б – опыт №8 (максимальное значение)

Обсуждение. К главным показателям качества поверхностного упрочнения, в том числе и лазерного, относится глубина упрочнения h (11, 37, 40). В результате обработки полученных экспериментальных данных модель для параметра отклика глубина h представляет собой полином второй степени. Полученная модель включает линейные эффекты, квадратичные эффекты и эффект взаимодействия факторов I_f . Эффекты факторов f_2 , f_1 , f_2I_1 , f_1I_2 имеют очень слабую корреляцию, поэтому в модель они не включены.

Результирующее уравнение регрессии по параметру глубины упрочненного слоя h принимает следующий вид:

$$h = -0,362874 + 0,018924f + 0,004444I - 0,000011I^2$$

Доля исходных экспериментальных данных, подчиняющихся полученной математической модели составляет 86 % ($R^2 = 0,86$). Это значение является прямым свидетельством высокой точности полученной модели для описания взаимосвязи параметров отклика и факторов процесса (35). Распределение факторов по величине их влияния на параметр отклика (толщина h) представлено в виде диаграммы Парето (рисунок 5).

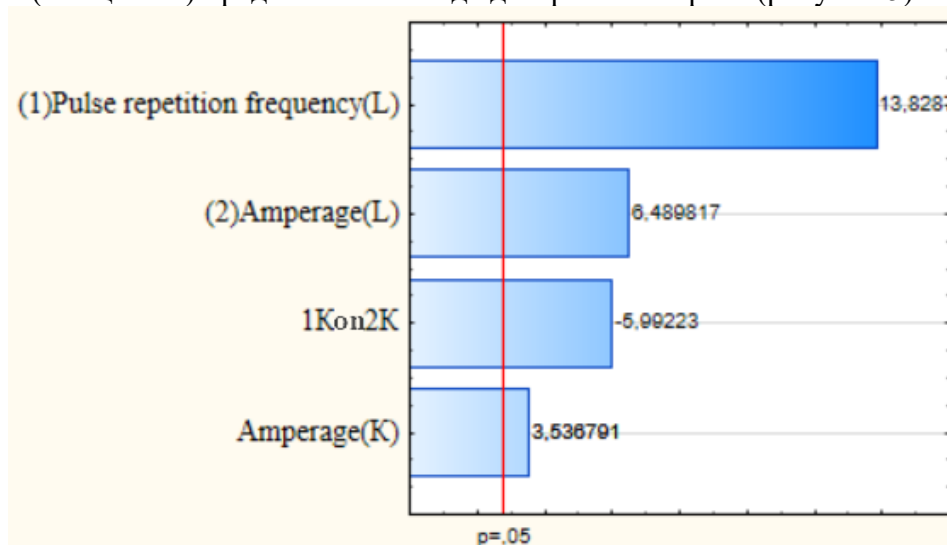


Рисунок 5. Диаграмма Парето влияния рассматриваемых факторов на отклик Глубина h

В результате проведения полного факторного эксперимента и последующей обработки его результатов удалось установить, что наиболее значимыми факторами, является Частота следования импульсов f (около 67 %) Далее идет фактор Сила тока I , который характеризует 19 % изменчивости. С помощью критерия Фишера получено подтверждение достоверности и статистической значимости воздействия технологических параметров на параметры отклика системы.

Математическая модель взаимосвязи параметра отклика твердость упрочненной поверхности HV и режимов импульсного лазерного излучения также включает в себя линейные эффекты, квадратичные эффекты и эффект взаимодействия факторов I_f . Доля исходных данных, подчиняющихся полученной модели составляет 98% ($R^2=0,98$). Эффекты факторов f_2 , I , f_1 , f_2I_2 имеют очень слабую корреляцию, поэтому в модель они не включены.

Уравнение регрессии для Твердости HV упрочненного слоя имеет вид:

$$HV = 812,9504 - 8,6421f + 0,0001I^2 + 0,0001fI^2 - 0,0167f^2I$$

Параметр отклика твердость упрочненной поверхности h в основном определяется частотой импульсов лазерного излучения f (на 86% изменчивость параметра отклика

определяется указанным фактором) (рисунок 6). Далее идут взаимодействие факторов f_1 и ток, подаваемый на лампу накачки I_2 , которых характеризует 10 % и 2% изменчивости соответственно. Получено опровержение значимости критерия ток, подаваемый на лампу накачки I_2 с использованием критерия Фишера. Статистически значимым является фактор Частота следования импульсов f и совокупность факторов f_1 .

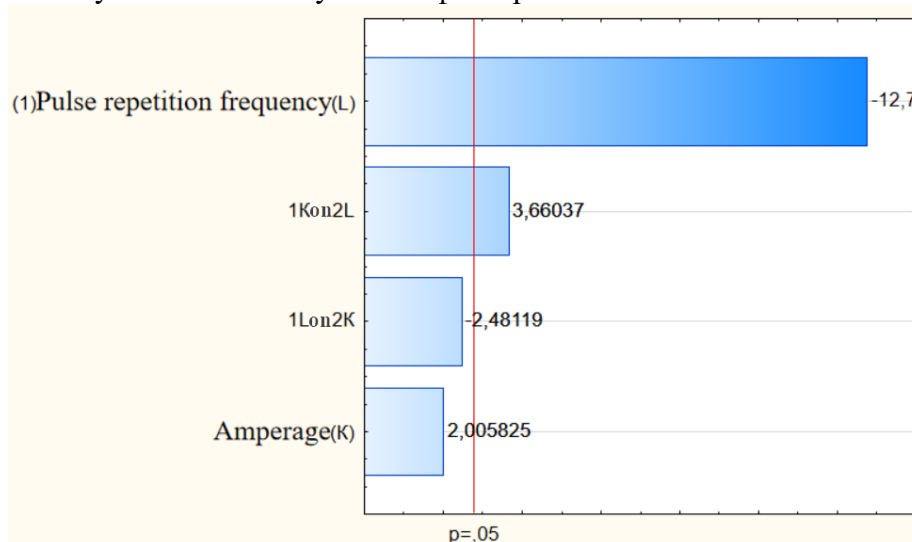


Рисунок 6. Диаграмма Парето влияния факторов на твердость

Благодаря графикам подогнанной поверхности (рисунок 7) можно определить область значения факторов, в которой Твердость HV и Глубина h поверхностного слоя является минимальной или максимальной.

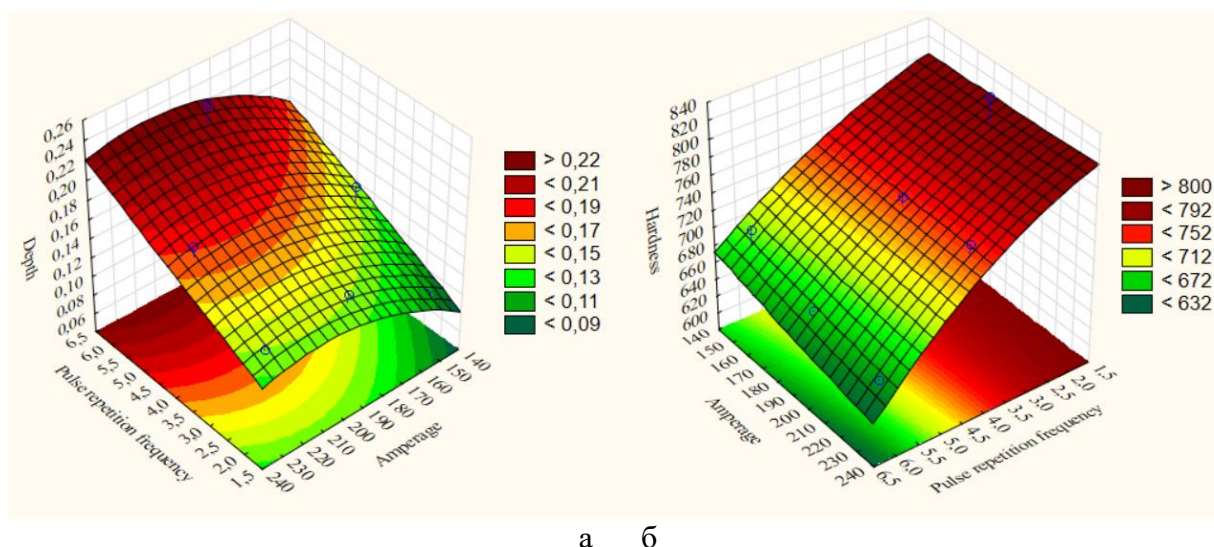


Рисунок 7. Поверхности отклика: а – глубина упрочнения (модифицирования) h ; б – Твердость упрочненно-модифицированной поверхности

Заключение. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены математические модели, позволяющие прогнозировать значение параметров отклика системы Твердости HV и Глубины h , упрочненной зоны. Математические модели представляют собой

полиномы первой степени. Для откликов модели линейны и не учитывают парные взаимодействия факторов. Для зависимых переменных Коэффициенты детерминации полученных моделей R^2 не менее 0,86.

При анализе полученных моделей установлено, что наиболее существенным фактором, влияющим на параметры отклика (глубину упрочнения h и твердость по Виккерсу HV) является частота лазерных импульсов f . Уменьшение абсолютного значения указанного фактора (при неизменных остальных рассматриваемых) обеспечивает увеличение значения твердости обработанной поверхности HV и уменьшение глубины упрочнения h .

Удалось повысить твердость заготовки пилы на 281 HV режиме № 2 с параметрами: скоростью перемещения лазерного пятна 120 мм/мин, частотой следования импульса 2 Гц, током накачки 190 А, длительностью лазерного импульса 8×10^{-3} с и диаметром лазерного пятна 2 мм.

Упрочнение на максимальную глубину (236 мкм) обеспечивается использованием следующих режимов: скорость сканирования – 120 мм/мин, частота лазерного воздействия – 6 Гц, ток, подаваемый на лампу накачки – 190А, ширина импульса 8×10^{-3} с и диаметром лазерного пятна 2 мм.

Список литературы

1. A. Q. Zaifuddin, M. H. Aiman, M. M. Quazi, M. Ishak, and T. Ariga, "Effect of Laser Surface Modification (LSM) on laser energy absorption for laser brazing," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Jun. 2020, vol. 788, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/788/1/012013.
2. Bai Y., Zhao C., Yang J., et al. 2021. Microstructure and machinability of selective laser melted high-strength maraging steel with heat treatment. Journal of Materials Processing Technology 288: 116906. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116906
3. Becker T.H., Kumar P., Ramamurty U. 2021. Fracture and fatigue in additively manufactured metals. Acta Materialia 219: 117240. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.117240 EDN: XGBLMU.
4. Belashova, I. S. Quantitative Evaluation of the Effectiveness of Laser Surface Modification Technologies / I. S. Belashova, E. A. Marinin, D. G. Sergeev // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 296-301. – DOI 10.4028/p-m3m347. – EDN LCCZOL.
5. Buj-Corral, I. Effect of process parameters on the quality of laser-cut stainless steel thin plates / I. Buj-Corral, L. Costa-Herrero, A. Domínguez-Fernández // Metals. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – DOI 10.3390/met11081224. – EDN SOUURU.
6. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of Inconel 718 Alloy Fabricated by Selective Laser Melting / R. Zhao, Z. Zhao, P. Bai [et al.] // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – DOI 10.1007/s11665-021-06212-2. – EDN KARWXY.
7. Effect of heat treatment on microstructure, hardness and tensile properties of high-speed selective laser melted Ti6Al4V / P. Lekoadi, M. Tlotleng, K. Annan [et al.] // MATEC Web of Conferences (см. в книгах). – 2022. – Vol. 370. – P. 11003. – DOI 10.1051/mateconf/202237011003. – EDN GWCBJD.
8. Effect of heat treatment on the strength and fracture resistance of a laser powder bed fusion-processed 18Ni-300 maraging steel / M. J. Paul, Y. Muniandy, Ja. J. Kruzic [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2022. – Vol. 844. – P. 143167. – DOI 10.1016/j.msea.2022.143167. – EDN YCJRVK.
9. Effects of post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of laser-welded NiTi/304SS joint with Ni filler / Y. Chen, S. Sun, T. Zhang [et al.] // Materials Science

and Engineering: A. – 2020. – Vol. 771. – P. 138545. – DOI 10.1016/j.msea.2019.138545. – EDN YVPZZW.

10. Forming of Composite Cutting Layer on Tool Steel by Heat Treatment of CVD Coatings / I. Belashova, L. Petrova, P. Demin, M. Prokofyev // Materials Research Proceedings, Temryuk, 06–10 сентября 2021 года. – Temryuk, 2022. – P. 199-203. – DOI 10.21741/9781644901755-35. – EDN QEGUAF.

11. Чайка Т.В. Влияние высокодисперсного порошка смеси WC и TiC на свойства композиционных материалов / Чайка Т.В., Гавриш В.М., Павленко В.И., Черкашина Н.И. Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. Т. 15. № 1. С. 14-26.

12. Heat treatment to regulate bismuth valence toward enhanced radiation resistance in barium gallo-germanate glass / Na. Yan, P. Xiong, B. Liu [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. – 2023. – Vol. 106, No. 2. – P. 1240-1249. – DOI 10.1111/jace.18861. – EDN SOMTKQ.

13. Influence of heat and laser treatment on the structure and properties of r6m5 high-speed steel / I. Stepankin, E. Pozdnyakov, Yu. Peshkun [et al.] // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2020. – Vol. 55, No. 3. – P. 672-675. – EDN BJFMZJ.

14. J. K. Chaurasia, A. N. Jinoop, P. P. C. P. Paul, K. S. Bindra, and S. Bontha, “Study of melt pool geometry and solidification microstructure during laser surface melting of Inconel 625 alloy,” Optik (Stuttg), vol. 246, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167766.

15. Kumar P., Jayaraj R., Zhu Z., et al. 2022. Role of metastable austenite in the fatigue resistance of 304L stainless steel produced by laser-based powder bed fusion. Materials Science and Engineering: A 837: 142744. DOI: 10.1016/j.msea.2022.142744 EDN: LVZVGU

16. Microstructure development of modified 9Cr-1Mo steel during laser powder bed fusion and heat treatment / T. Hatakeyama, K. Sawada, M. Suzuki, M. Watanabe // Additive Manufacturing. – 2023. – Vol. 61. – P. 103350. – DOI 10.1016/j.addma.2022.103350. – EDN BIILXQ.

17. New nitriding process of high-alloyed maraging steel for cryogenic operation / I. S. Belashova, L. G. Petrova, A. S. Sergeeva, P. S. Bibikov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 17 сентября 2020 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 012004. – DOI 10.1088/1757-899X/1064/1/012004. – EDN SWFPGM.

18. Paczkowska, M. Microstructure and Soil Wear Resistance of a Grey Cast Iron Alloy Reinforced with Ni and Cr Laser Coatings / M. Paczkowska, Ja. Selech // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 9. – P. 3153. – DOI 10.3390/ma15093153. – EDN XPMIJD.

19. Paul M.J., Liu Q., Best J.P., et al. 2021. Fracture resistance of AlSi10Mg fabricated by laser powder bed fusion. Acta Materialia 211: 116869. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116869

20. Surface Modification of Aluminum Alloy by Shot Lining and Laser Irradiation / Ya. Harada, Yu. Nakashima, A. Nagao [et al.] // Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity. – 2022. – Vol. 63, No. 733. – P. 25-31. – DOI 10.9773/sosei.63.25. – EDN RBEIHN.

21. Surface modification of high-Mn steel via laser-DED: Microstructural characterization and hot crack susceptibility of clad layer / Du. R. Eo, S. G. Chung, J. Yang [et al.] // Materials & Design. – 2022. – Vol. 223. – P. 111188. – DOI 10.1016/j.matdes.2022.111188. – EDN HNUUHX.

22. Zohuri B. Thermal Effects of High Power Laser Energy on Materials. USA: Springer, 2021. 420 p.

23. Анализ развития комбинированных электрофизических методов упрочнения деталей машин и инструмента / А. М. Колосовский, В. И. Вихтевский, Е. Б. Тристанова, Е. Ф. Черкашина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 2(346). – С. 77-85. – DOI 10.33979/2073-7408-2021-346-2-77-85. – EDN DTGURA.

24. Белашова, И. С. Количественная оценка эффективности лазерных технологий поверхностного модифицирования / И. С. Белашова, Е. А. Маринин, В. А. Лисовский // Черные металлы. – 2023. – № 7. – С. 47-51. – DOI 10.17580/chm.2023.07.05. – EDN GVVTFP.

25. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров ; под редакцией А. Г. Григорьянца. — Москва : МГТУ им. Баумана, 2006. — 664 с.
26. Колосовский, А. М. Анализ современных лазерных методов упрочнения деталей машин и инструмента / А. М. Колосовский, Е. Б. Тристанова, Е. Ф. Черкашина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2021. — № 1(345). — С. 53-59. — DOI 10.33979/2073-7408-2021-345-1-53-59. — EDN AYLYJM.
27. Нетета, С. В. Исследование влияния исходного состояния поверхности на процесс лазерного импульсного упрочнения поверхности нержавеющей стали / С. В. Нетета // Перспективные материалы науки, технологий и производства: Сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Курск, 24 мая 2022 года. — Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. — С. 222-227. — EDN SIZHSC.
28. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., исправл. и доп. / Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. и др. Под ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
29. Овчинников В. В. Технология термической обработки: учеб. М.: ИД ФОРУМ, НИЦ ИНФА-М, 2016. 320 с.
30. Остапчук, А. К. Синергетический подход к определению отклика технологической системы на внешнее воздействие / А. К. Остапчук, В. Е. Овсянников // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2011. — № 3(11). — С. 36-41. — EDN OIYAIF.
31. Остапчук, А. К. Метод оценки погрешности формы деталей гидравлических систем транспортных машин / А. К. Остапчук, Е. Ю. Рогов, В. Е. Овсянников // Транспорт Урала. — 2011. — № 2(29). — С. 38-40. — EDN NWGZDF.
32. Петрова, Л. Г. Совершенствование технологий химико-термической обработки для поверхностного упрочнения высоколегированных сталей авиационного назначения / Л. Г. Петрова, И. С. Белашова, П. С. Бибилов // Наукоемкие технологии в машиностроении. — 2022. — № 8(134). — С. 3-11. — DOI 10.30987/2223-4608-2022-8-3-11. — EDN COUEXH.
33. Проскуряков, В. И. Разработка технологии тонкослойного лазерного модифицирования хромоникелевой стали 12X18H10T / В. И. Проскуряков, И. В. Родионов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2022. — № 3(63). — С. 85-96. — DOI 10.21685/2072-3059-2022-3-9. — EDN DQDWSN.
34. Сергеев Д.Г. Изучение причин преждевременного выхода ленточных пил из строя // В сборнике: ОБЩЕСТВО, НАУКА, ИННОВАЦИИ (НПК-2016). Сборник статей 2-е издание, исправленное и дополненное. Вятский государственный университет. 2016. С. 1163-1167.
35. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А.А. — М.: Машиностроение, 1981. — 184 с.
36. Стерин И.С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки: учеб. пособие / Стерин И.С. — СПб.: Политехника, 2003. — 344 с.
37. Структура и механические свойства поверхностных слоев конструкционных и инструментальных сталей, сформированных лазерным легированием карбидообразующими элементами и бором / Г. Н. Гаврилов, П. Л. Жилин, А. В. Братухин [и др.] // Вестник машиностроения. — 2021. — № 4. — С. 41-46. — DOI 10.36652/0042-4633-2021-4-41-46. — EDN UYGPDP.
38. Халафян А.А. Промышленная статистика: Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA Учебное пособие / Халафян А.А. — М.: Либроком, 2013. — 384 с.
39. Шматов, А. А. Применение термогидрохимической технологии упрочнения инструментов в машиностроении / А. А. Шматов, Л. Шоош, З. Крайни // Материаловедение. — 2022. — № 12. — С. 39-45. — DOI 10.31044/1684-579X-2022-0-12-39-45. — EDN DPTOPW.

40. Яресько, С. И. Оптимальная схема лазерного упрочнения вершины режущего клина инструмента / С. И. Яресько, С. Н. Балакиров // *Frontier Materials & Technologies*. – 2021. – № 4. – С. 98-106. – DOI 10.18323/2782-4039-2021-4-98-106. – EDN PRKKQE.

УДК 621.787

ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Э.С. Гордеева¹

¹Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Изменение физико-механических свойств поверхностного слоя, создание более однородной структуры и субструктуры в сочетании с образованием остаточных сжимающих напряжений и увеличением опорной поверхности приводит к повышению его контактной жесткости, прочности и износостойкости. В результате возрастает сопротивление деформациям в процессе работы деталей машин, что, в свою очередь, замедляет образование усталостных трещин и отдаляет время отрыва частиц при трении скольжения и время разрушения детали или наступления поверхностного выкрашивания при трении качения.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, деформированный слой, шероховатость поверхности, прирост твердости, остаточные напряжения.

THE EFFECT OF FINISHING AND HARDENING TREATMENT ON THE MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS MADE OF HIGH-STRENGTH MATERIALS

E.S. Gordeeva¹

¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

A change in the physical and mechanical properties of the surface layer, the creation of a more homogeneous structure and substructure, combined with the formation of residual compressive stresses and an increase in the bearing surface, leads to an increase in its contact stiffness, strength and wear resistance. As a result, the resistance to deformation increases during the operation of machine parts, which, in turn, slows down the formation of fatigue cracks and delays the time of separation of particles during sliding friction and the time of destruction of the part or the onset of surface discoloration during rolling friction.

Keywords: surface plastic deformation, deformed layer, surface roughness, hardness gain, residual stresses.

Введение. Решение задачи повышения надежности и долговечности деталей машин требует применения новых высокопроизводительных методов обработки и технологического оборудования, обеспечивающих высокую точность и качество поверхностного слоя деталей

машин, высокую твердость, низкую шероховатость, надежные эксплуатационные свойства. Это зависит от внедрения новых прогрессивных методов упрочняющей обработки

Основная часть. Среди технологических методов, обеспечивающих повышение прочности и жесткости, большая роль принадлежит поверхностному пластическому деформированию (ППД) рабочих элементов деталей машин. К наиболее простым и эффективным методам ППД относятся методы обкатывания шаром, алмазное выглаживание, обкатывание с наложением ультразвуковых колебаний (ультразвуковое упрочнение) и обработку вращающимися механическими щетками [1-3].

Упрочнение исследовалось на изделиях из различных легированных сталей, подвергнутых закалке с низким отпуском со структурой мартенсита отпуска с твердостью HRC 56 – 62 и упрочнение некоторых титановых сплавов [2,4].

Обкатывание шаром, алмазное выглаживание и ультразвуковое упрочнение производили инструментом с радиусом сферы 1,5 – 3,0 мм. Нормальное усилие, передаваемое детали, составляло 250 -2000 Н при обкатывании, 50 – 500 Н при выглаживании и 50 – 300 Н при ультразвуковом упрочнении. Подачу изменяли от 0,03 да 0,12 мм/об, скорость обработки от 0,2 до 1,5 м/с. При ультразвуковом упрочнении амплитуду колебаний деформирующего инструмента изменяли в пределах от 5 до 12 мкм.

Рабочими элементами механических щеток служили гибкие стальные проволоочки диаметром 0,3 – 0,4 мм и длиной 50 – 80 мм. Окружная скорость щеток диаметром 200 – 300 мм изменялась от 20 до 38 м/с, натяг, создаваемый винтом поперечной подачи токарного станка, составлял 2,0 – 4,0 мм, время обработки при отсутствии продольной подачи 20 – 30 с. [2]

Особое внимание было уделено изучению физической стороны процесса упрочнения.

При поверхностном механическом наклепе практически вся энергия переходит в теплоту, локализирующуюся в очаге деформации [3,5]. Интенсивные режимы обработки сопровождаются высоким нагревом поверхностной зоны, что ведет к нежелательным термопластическим деформациям. Иногда это приводит к структурным изменениям. Поэтому режимы обработки должны обеспечивать образование таких температурных полей, которые не снижали бы положительных результатов упрочнения.

Максимальная температура наиболее деформированного слоя при отделочно-упрочняющем обкатывании закаленных сталей составляет 150 – 350 °С, при выглаживании она может достигать 500 – 800 °С, при упрочняющем обкатывании роликами на интенсивных режимах – 600 – 650 °С.

Содержание остаточного аустенита при пластическом деформировании сталей со структурой мартенсита уменьшается. Как известно, превращение аустенита в мартенсит сопровождается объемным эффектом. С увеличением количества аустенита, превращенного при деформации в мартенсит, остаточные напряжения растут и повышается твердость (см. табл.1.).

Таблица 1. Влияние остаточного аустенита на прирост твердости и остаточные напряжения в образцах из стали 14X2H3МА при обкатывании шаром диаметром 10 мм.

Остаточный аустенит, %		Прирост твердости, ΔHV	Толщина наклепа, мм	Напряжение (- σ), МПа	
до обкатывания	после обкатывания			- σ _{max}	глубина залегания
29	14	90	1,3	670	1,4
45	16	130	1,55	820	1,7

При пластическом деформировании в тонком верхнем слое происходит измельчение и разориентировка пластин мартенсита, усиливающиеся с ростом давления. В процессе

деформации происходит также выделение высокодисперсных карбидов, блокирующих сдвиги по плоскостям скольжения. Получение более высокой степени дисперсности неоднородностей строения усиливает упрочнение.

Поверхностное пластическое деформирование сопровождается ростом плотности дислокаций, дроблением блоков и увеличением микроискажений. Существенное значение имеет повышение при упрочнении структурной однородности наиболее деформированного верхнего слоя [6,7].

Так как в упрочнении большую роль играет дисперсионное твердение, изменение плотности дислокаций и превращение остаточного аустенита в мартенсит, то следует ожидать, что эффект упрочнения в наибольшей мере должен проявиться в сталях со структурой мартенсита. Наибольший прирост твердости (до 200 HV) наблюдается у мартенситных структур, когда действуют все указанные факторы, а наименьший (20 – 40 HV) у сталей со структурой сорбита.

Установлено, что прирост твердости, остаточные напряжения поверхностного слоя, его структурные изменения и шероховатость поверхности зависят от метода обработки и определяются величиной деформирующих напряжений и другими параметрами процесса, а также свойствами, химическим составом, структурой материала и исходной шероховатостью.

Наименьший прирост твердости по Виккерсу (от 8 до 15%) при наибольшей толщине упрочненного слоя (0,3 – 0,8 мм) происходит в случае обкатывания шаром. При алмазном выглаживании, ультразвуковом упрочнении и обработке щетками прирост твердости выше (от 8 до 20 – 22%), при толщине упрочненного слоя соответственно 0,1 – 0,3 мм; 0,1 – 0,25 мм и 0,04 – 0,08 мм.

При упрочнении щетками титановых сплавов с прочностью ($\sigma_b = 650 - 900$ МПа), прирост твердости составляет 15 – 30% при толщине упрочненного слоя 0,1 – 0,3 мм.

В процессе деформирования при всех методах отделочно-упрочняющей обработки формируются остаточные напряжения, достигающие наибольшего значения при обработке щетками (600 – 1100 МПа) и алмазном выглаживании (500 – 850 МПа). При обкатывании шаром формируются остаточные напряжения меньшей величины (400 – 750 МПа), но с большей глубиной залегания. Аналогичная разница в величине остаточных напряжений при обкатывании, выглаживании, упрочнении щетками и ультразвуковом упрочнении наблюдается и при исследовании других материалов [5,6].

В ряде случаев, по условиям эксплуатации деталей требуется интенсивное упрочнение при толщине слоя более 0,3 мм. Подобная задача может быть решена применением комбинированного метода, т.е. обкатыванием шаром с последующей обработкой, например, щетками или другим методом. Поверхностная твердость в этом случае дополнительно возрастет на 4 – 6%. Остаточные сжимающие напряжения также возрастут до 800 – 1100 МПа с расположением максимума у поверхности. При комбинированном упрочнении легче регулировать остаточные напряжения за счет изменения режимов обработки. В этом случае существенно изменяются остаточные напряжения в верхнем слое, вторично деформированном при обработке щетками. В более глубоких слоях, до перемены знака, напряжения практически не меняются по сравнению с таковыми в обкатанных образцах.

При упрочнении щетками титановых сплавов формируются остаточные сжимающие напряжения с максимальным значением 400 – 1000 МПа и глубиной залегания 0,1 – 0,3 мм. Применение щеток с ударными элементами обеспечивает формирование более высоких остаточных сжимающих напряжений с большей глубиной их залегания [6,7].

В процессе отделочно-упрочняющей обработки формируется новая шероховатость, зависящая от параметров процесса, исходного состояния поверхности, свойств обрабатываемого материала и размеров инструмента. Следует отметить, что алмазное

выглаживание, в силу особенностей процесса, происходящего в условиях трения скольжения, при оптимальных давлениях почти полностью сглаживает исходные неровности. Поэтому выглаживание по сравнению с остальными методами обеспечивает получение меньшей шероховатости.

Обкатывание шаром и УЗУ приводят к снижению шероховатости поверхности с $Ra = 0,35 - 1,2$ до $Ra = 0,2 - 0,32$ мкм, а алмазное выглаживание – до $Ra 0,09 - 0,15$ мкм. Обработка различных материалов механическими щетками снижает шероховатость в 1,3 – 2,0 раза.

Снижение шероховатости поверхности, сопровождаемое увеличением радиусов закругления вершин и впадин шероховатостей, во всех случаях значительно увеличивает опорную длину профиля, что благоприятно влияет на контактную жесткость и другие эксплуатационные характеристики деталей.

Применение рассматриваемых методов на финишных операциях приводит к повышению износостойкости трущихся поверхностей в 1,5 – 3,5 раза, контактной выносливости в 1,6 – 2,4 раза и сопротивления усталости в 1,3 – 2,2 раза.

Анализ технологических возможностей рассмотренных методов и их влияние на эксплуатационные свойства деталей машин позволяет отдать предпочтение обкатыванию шаром в тех случаях, когда требуется создание более глубокого упрочненного слоя при обработке деталей, обладающих достаточной жесткостью. Алмазное выглаживание и ультразвуковое упрочнение целесообразно применять для получения более интенсивного, но менее глубокого упрочненного слоя, при обработке мало жестких деталей. С этой целью (независимо от жесткости детали), но при более низких требованиях к шероховатости, рекомендуется обработка механическими щетками. Для интенсивного упрочнения титановых сплавов следует применять щетки с ударными элементами. При высоких требованиях к шероховатости поверхности деталей из закаленных сталей следует отдать предпочтение алмазному выглаживанию.

Таким образом поверхностное упрочнение является существенным резервом повышения работоспособности изделий. При проектировании технологических процессов необходимо стремиться к оптимизации режимов отделочно-упрочняющей обработки, которая должна осуществляться на основе количественных взаимосвязей между технологическими факторами, физико-механическими свойствами материала детали и теми изменениями, которые происходят в поверхностном слое.

Список литературы

1. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2-х томах. Т. 1 / Под общ. ред. А.Г. Сулова. — М.: Машиностроение, 2014 — 480 с.: ил.
2. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография / И. Р. Асланян [и др.], под ред. С. А. Зайдеса; Иркут. гос. техн.ун-т. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014 - 559 с.
3. Бойцов, В. Б. Технологические методы повышения прочности и долговечности: учеб. пособие для вузов / В. Б. Бойцов, А. И. Чернявский. - М.: Машиностроение, 2005 - 127 с.
4. Канивец А.В. Вибрационная обработка при изготовлении и восстановлении деталей//Технологический аудит и резервы производства. 2013. № 5/4(13). С. 60-61.
5. Tamarkin M., Tishchenko E., Murugova E. Technological design processes of vibration processing of particularly accurate parts of agricultural machinery// В сб.: E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don. 2021. С. 07032.

6. Гордеева Э. С., Богуцкий В. Б. Оценка влияния геометрических характеристик обрабатываемой детали и частиц рабочей среды на процесс вибрационной упрочняющей обработки. Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т. 10. № 1. С. 76-85.7.

7. Гордеева Э.С., Шрон Л.Б., Ягьяев Э.Э. Обеспечение максимальной износостойкости поверхностей деталей с упрочненным поверхностным слоем в результате приработки.

Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2024. № 2 (84). С. 292-298.

РАЗДЕЛ III ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 339.13:[641.11:612.392.75]

АНАЛИЗ РЫНКА БАТОНЧИКОВ МЮСЛИ И СОЕВОГО МЯСА

*Д.О. Ерёменко¹,
О.П. Чуб¹*

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Проведен анализ литературных источников, в котором подробно рассмотрен химический состав семян сои, в которых содержатся химические вещества, физиологическое воздействие которых на организм человека расценивают неоднозначно. К ним относятся ингибиторы трипсина, лектины, сапонины, фитаты, изофлавоны. В сое этих веществ больше, чем в большинстве возделываемых культур. Описаны современные технологии переработки и ассортимент продукции из соевого сырья. Произведен анализ рынка сухих завтраков и спрогнозирован объем их потребления на ближайшее пятилетие.

Ключевые слова: белок, соя, соевый белок, сухие завтраки, батончики мюсли, рынок, флекситарианства, объем потребления, динамика потребления, прогноз.

THE ANALYSIS OF THE MUESLI BARS AND SOY MEAT MARKET

*D.O. Eremenko¹,
O.P. Chub¹*

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

ABSTRACT

A literature review examines in detail the chemical composition of soy beans, which contain chemicals whose physiological effects on the human body are controversial. These include trypsin inhibitors, lectins, saponins, phytates, and isoflavones. Soybeans contain more of these substances

than most cultivated crops. Modern processing technologies and the range of soybean products are described. An analysis of the breakfast cereal market was conducted, and consumption volumes for the next five years were forecast.

Keywords: protein, soy, soy protein, breakfast cereals, muesli bars, market, flexitarianism, consumption volume, consumption dynamics, forecast.

Запас белка в организме человека практически отсутствует, а новые белки могут синтезироваться только из аминокислот, поступающих с пищей, и распадающихся белков тканей организма [1].

Дефицит белка уменьшает устойчивость организма к инфекциям, так как снижается уровень образования антител. Нарушается синтез и других защитных факторов – лизоцима и интерферона, из-за чего обостряется течение воспалительных процессов. Кроме того, белковая недостаточность часто сопровождается авитаминозом В12, А, Д, К и так далее, что также влияет на состояние здоровья. Любая физическая активность наносит вред клеткам мышц, и чем больше нагрузка, тем больший вред она наносит мышцам. Для «ремонта» поврежденных мышечных клеток требуется достаточное количество качественного белка.

В настоящее время качество пищевых белков оценивают по коэффициенту их усвоения. Он учитывает аминокислотный состав и полноту переваривания белков. Продукты, имеющие коэффициент усвоения равный 1,0 являются наиболее полноценными источниками белка [2].

Во всем мире рынок сухих завтраков является наиболее динамичным и развивающимся в плане новых продуктов, решений в упаковке и способов потребления. Два фактора, которые определяют потенциал развития рынка, – это растущий спрос на продукты быстрого приготовления и потребления со стороны жителей городов и мода на здоровое питание или здоровый перекус [3].

В связи с этим исследование, направленное на внедрение новых видов продукта, можно считать актуальным и перспективным направлением в пищевой промышленности.

Соя – растение семейства бобовых, родиной которого является территория Восточной Азии, включая Японию, Китай, Корею и часть Индии. В этих странах как культурное растение она сформировалась не менее 6-7 тыс. лет назад. Большую роль в распространении этой культуры сыграла опубликованная в 1878г. книга Хэберладта «Возможность выращивания сои в Европе». В России первое упоминание о выращивании сои относится к 1643-1644 гг. Но, невзирая на то, что использование сои на пищевые цели в Юго-Восточной Азии уходят своими корнями в очень давние времена, в странах Запада ее использование началось в основном в XX вв. [3].

Семена сои имеют очень своеобразный химический состав. При таком количестве белка и незаменимых аминокислот ей нет равных не только среди зерновых, масленичных, но и бобовых культур (таблица 1).

Таблица 1. Химический состав некоторых культур

Показатель, %	Соя	Фасоль	Горох	Подсолнечник	Кукуруза	Пшеница	Рис
Белок	36,7	22,3	23,0	20,7	9,1-10,3	11,6-12,7	7,3
Незаменимые аминокислоты	12,8	8,0	8,3	6,2	3,0-3,5	3,4-3,7	2,7
Липиды	17,8	-	2,0	52,9	4,8-4,9	2,1-2,8	2,5
Сахара	10,2	3,4	5,9	-	1,0-1,8	1,0-1,7	1,0
Крахмал	3,5	43,4	46,5	-	57,3-59,8	52,4-54,9	55,2
Полисахариды	10,6	7,6	13,1	-	2,1-2,2	8,2-10,2	14,1

Высокая ценность сои как сырья для пищевой промышленности связана с повышенным содержанием биологически активных компонентов (клетчатка, кальций, железо, цинк, магний и др.). Питательные качества белков сои определяются в основном такими факторами как высокая усвояемость и достаточно полноценный состав незаменимых аминокислот. По фракционному составу белковый комплекс сои представлен высоким (до 50%) уровнем содержания водорастворимых альбуминов и солерастворимых глобулинов, наиболее хорошо усвояемых организмом человека. Низкое содержание крахмала и одновременно достаточно большое количество других полисахаридов, позволяет считать сою незаменимой в рациональном и диетическом питании, особенно для больных диабетом [4].

Но, несмотря на это, в сое содержатся и химические вещества, физиологическое воздействие которых на организм человека расцениваются неоднозначно. К ним относятся ингибиторы трипсина, лектины, сапонины, фитаты, изофлавоны. В сое этих веществ больше, чем в большинстве возделываемых культур [5].

Наиболее подробно химический состав семян сои представлен в таблице 2.

На сегодняшний день рынок мюсли является частью более широкого рынка сухих завтраков и относится к продуктам здорового питания. Формироваться данное направление пищевой промышленности стало относительно недавно. По результатам наблюдений, в России наиболее динамично развиваются такие направления производства здорового питания, как выпуск продуктов, предназначенных для лиц, активно занимающихся спортом и фитнесом, для беременных женщин и кормящих мам; а также способствующих профилактике ожирения (метаболического синдрома), диабета или предназначенных для коррекции веса тела; содействующих укреплению иммунитета с использованием в рецептуре продукта пре- и пробиотиков; применяемых для профилактики остеопороза и укрепления здоровья костей и суставов.

Также сохраняется устойчивый интерес к производству продуктов, обогащенных витаминами, макро- и микроэлементами. Вдобавок, в последнее время, чувствуется растущий спрос на производство продуктов с «чистой этикеткой» (без Е-кодов) и, в частности, продуктов без консервантов, красителей, антибиотиков и т.п.

Объем потребления батончиков мюсли в 2024 году составил 35 351 тонну, что на 8% больше, чем в 2023 году (рисунки 1, 2). По предварительным итогам, в 2025 году рост потребления составил 17% – до 41 219 тонн.

В среднесрочной перспективе до 2029 года прогнозируется постепенное увеличение, как объема локального производства, так и импортных поставок батончиков мюсли на фоне продолжающегося роста потребления. В розничном сегменте ожидается усиление маркетинговой политики ведущих иностранных игроков, реализующих свою продукцию в крупных федеральных сетях.

Ежегодный рост объемов потребления батончиков мюсли составит порядка 107%, и, как ожидается, к 2029 году достигнет 52 231 тонну (рисунок 3).

В свою очередь, в перспективе до 2029 года ожидается увеличение доли экспорта, что обусловлено в основном растущим спросом на данную продукцию.

При этом ключевым фактором развития рынка батончиков станут потребительские предпочтения населения и наметившийся тренд на здоровое питание – постепенный отказ от сахара, соли и искусственных ингредиентов. Формирование новых покупательских предпочтений способствует росту объема потребления как здоровых снеков в общем, так и батончиков мюсли, в частности.

Таблица 2. Химический состав семян сои

Нутриент	Количество	Норма	% от нормы в 100 г	% от нормы в 100 кКал	100 % нормы
Калорийность	364 кКал	1684 кКал	21,6%	5,9%	1685 г
Белки	36,7 г	76 г	48,3%	13,3%	76 г
Жиры	17,8 г	60 г	29,7%	8,2%	60 г
Углеводы	17,3 г	211 г	8,2%	2,3%	211 г
Пищевые волокна	13,5 г	20 г	67,5%	18,5%	20 г
Вода	12 г	2400 г	0,5%	0,1%	2400 г
Зола	5 г	-			
Витамины					
Витамин А, РЭ	12 мкг	900 мкг	1,3%	0,4%	923 г
В-каротин	0,07 мг	5 мг	1,4%	0,4%	5 г
Витамин В1, тиамин	0,94 мг	1,5 мг	62,7%	17,2%	1 г
Витамин В2, рибофлавин	0,22 мг	1,8 мг	12,2%	3,4%	2 г
Витамин В4, холин	270 мг	500 мг	54%	14,8%	500 г
Витамин В5, пантотеновая	1,75 мг	5 мг	35%	9,6%	5 г
Витамин В6, пиридоксин	0,85 мг	2 мг	42,5%	11,7%	2 г
Витамин В9, фолаты	200 мкг	400 мкг	50%	13,7%	400 г
Витамин Е, альфа токоферол, ТЭ	1,9 мг	15 мг	12,7%	3,5%	15 г
Витамин Н, биотин	60 мкг	50 мкг	120%	33%	50 г
Витамин РР, НЭ	9,7 мг	20 мг	48,5%	13,3%	20 г
Ниацин	2,2 мг	-			
Макроэлементы					
Калий, К	1607 мг	2500 мг	64,3%	17,7%	2499 г
Кальций, Са	348 мг	1000 мг	34,8%	9,6%	1000 г
Кремний, Si	177 мг	30 мг	590%	162,1%	30 г
Магний, Mg	226 мг	400 мг	56,5%	15,5%	400 г
Натрий, Na	6 мг	1300 мг	0,5%	0,1%	1200 г
Сера, S	244 мг	1000 мг	24,4%	6,7%	1000 г
Фосфор, Ph	603 мг	800 мг	75,4%	20,7%	800 г
Хлор, Cl	64 мг	2300 мг	2,8%	0,8%	2286 г
Микроэлементы					
Алюминий, Al	700 мкг	-			
Бор, В	750 мкг	-			
Железо, Fe	9,7 мг	18 мг	53,9%	14,8%	18 г
Йод, I	8,2 мкг	150 мкг	5,5%	1,5%	149 г
Кобальт, Co	31,2 мкг	10 мкг	312%	85,7%	10 г
Марганец, Mn	2,8 мг	2 мг	140%	38,5%	2 г
Медь, Cu	500 мкг	1000 мкг	50%	13,7%	1000 г
Молибден, Mo	99 мкг	70 мкг	141,4%	38,8%	70 г
Никель, Ni	304 мкг	-			
Стронций, Sr	67 мкг	-			
Фтор, F	120 мкг	4000 мкг	3%	0,8%	4000 г
Хром, Cr	16 мкг	50 мкг	32%	8,8%	50 г
Цинк, Zn	2,01 мг	12 мг	16,8%	4,6%	12

Стоит отдельно отметить, что для рынка характерна следующая особенность: при росте доходов населения не стоит ожидать резкого увеличения потребления батончиков мюсли. В свою очередь, при падении уровня доходов первое, от чего начнет отказываться население, – это именно батончики, так как культура потребления здоровых продуктов и снеков находится на стадии формирования, а покупка подобной продукции носит, в том числе, импульсивный характер [6].

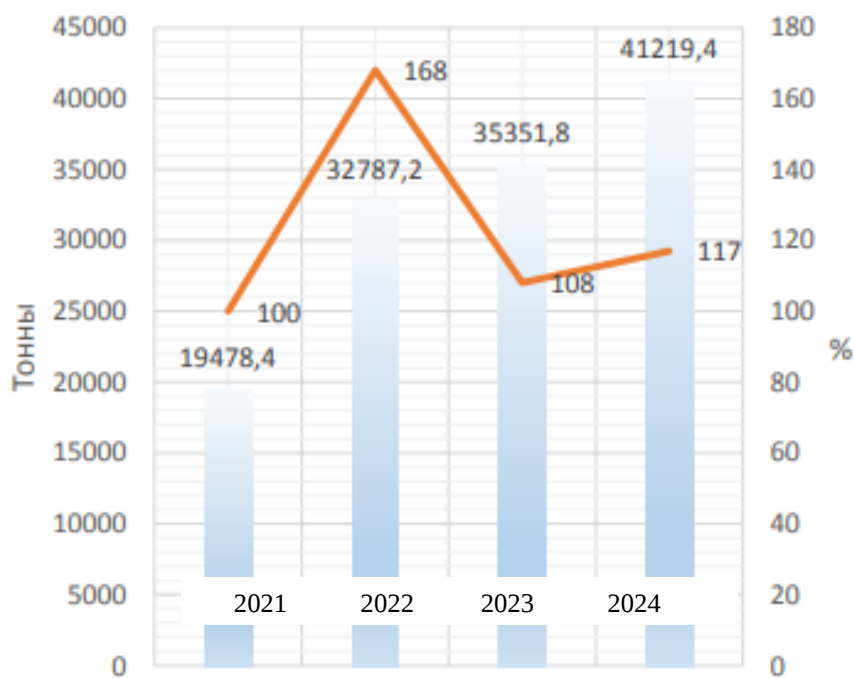


Рисунок 1. Динамика потребления батончиков мюсли в 2021-2024 годах в натуральном выражении

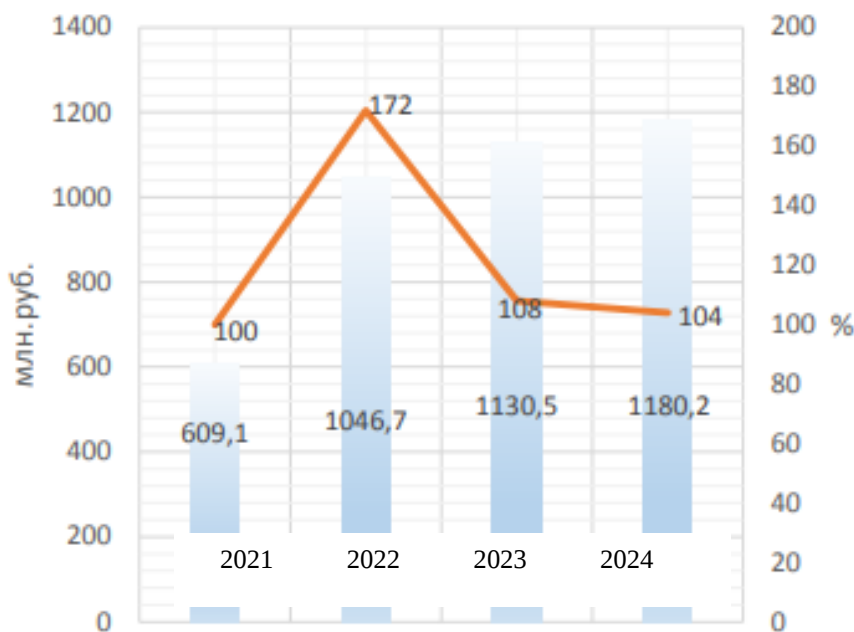


Рисунок 2. Динамика потребления батончиков мюсли в 2022-2024 годах в стоимостном выражении

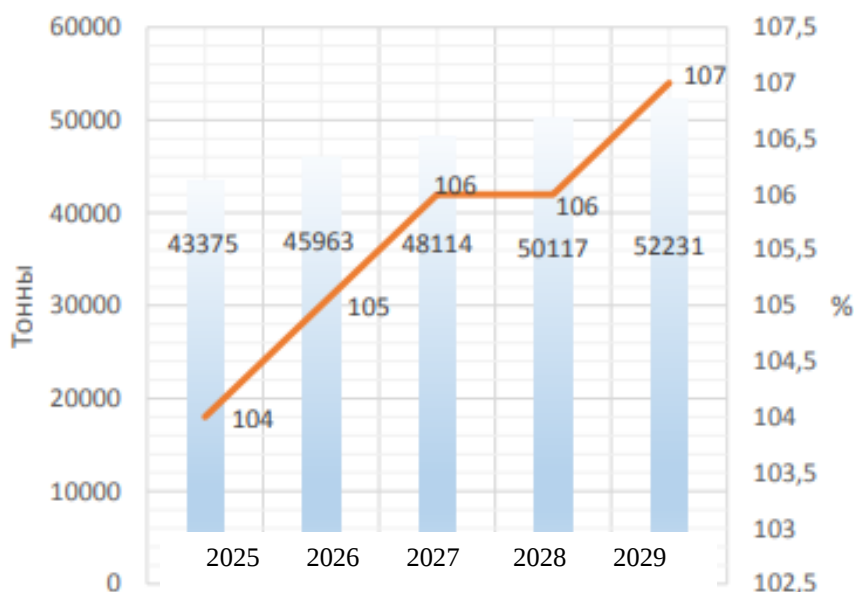


Рисунок 3. Прогноз объемов совокупного потребления батончиков мюсли в 2025-2029 годах в натуральном выражении

На данный момент рынок сои можно разделить на две группы: промышленную (производящую товарную соевую продукцию) и потребительскую (потребляющую ее). Потребительский рынок представляет собой множество мелких компаний, которые работают в системе реселлинга. Промышленный же сегмент рынка в последние годы динамично набирает обороты. Во-первых, это связано с повышением спроса со стороны животноводов, во-вторых, постоянным спросом на текстураты и изоляты со стороны мясопереработчиков. К тому же производство требует меньших вложений, следовательно, более выгодно. Например, специалисты приводят следующие данные: при возделывании сои 1 га пашни обеспечивает по потребности в протеине 5494 человеко-дня, в то время как при выращивании пшеницы этот показатель составляет 2166 человеко-дней, риса и кукурузы – 1909 человеко-дней, а при откорме молочного стада крупного рогатого скота – 583, при откорме птицы – 457, свиней – 318, при откорме крупного рогатого скота на мясо – 190. Следовательно, соя намного выгоднее в производстве с экономической точки зрения [7].

Для анализа характера потребности продуктов переработки сои в отраслях пищевой промышленности аналитической компанией Market Advice (Москва) были проведены дополнительные исследования, в результате которых было выявлено, что максимальные объемы применения соевых белков приходятся на мясоперерабатывающую и молочную промышленность. Ввиду того что наибольший объем принадлежит предприятиям мясоперерабатывающего комплекса, рационально проанализировать данные исследования по степени использования соевых белков в зависимости от вида продукта переработки (рисунок 4).

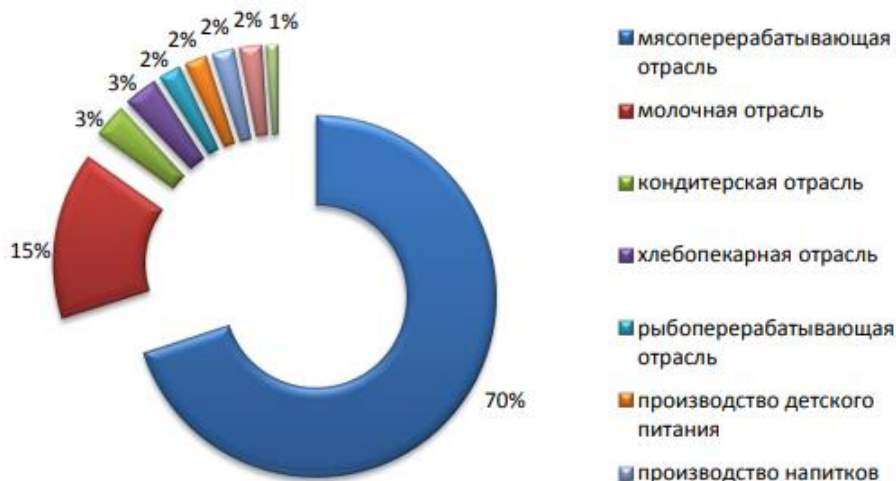


Рисунок 4. Использование соевых белков в отраслях пищевой промышленности России

Несмотря на все споры о пользе и вреде сои, объем потребления продуктов с ее содержанием растут с каждым годом, как в нашей стране, так и за рубежом.

Употребление в пищу растительного мяса является одним из пунктов существующего тренда – флекситарианства. Это стремление есть животное мясо как можно реже, стараясь заменить его растительными альтернативами. Современные люди стараются проявлять больше заботы о своем здоровье и об окружающей среде [8, 9, 10]. Мировой рынок альтернативных мясных продуктов в 2024 году оценивается в \$12,1 млрд., по данным компании Markets and Markets (рисунок 5).

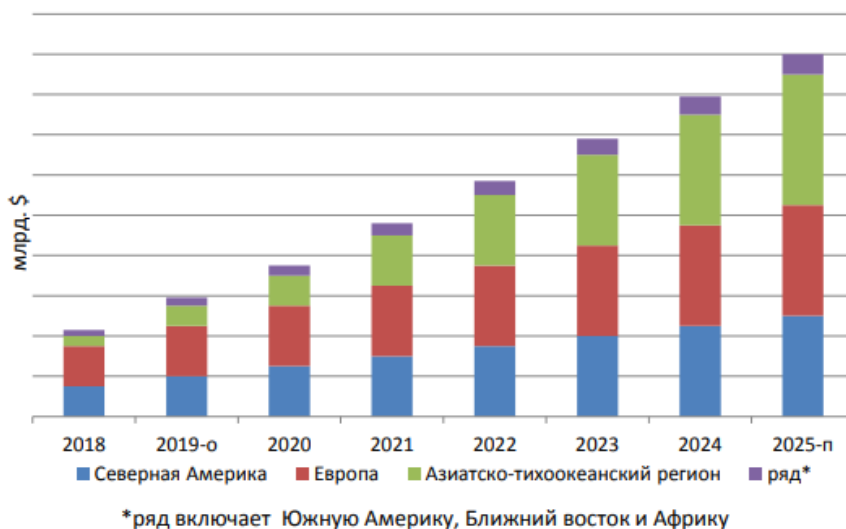


Рисунок 5. Рынок растительного мяса в разбивке по регионам

В отечественных неспециализированных магазинах можно найти соевое мясо, овощные котлеты. В специализированных вегетарианских или диетических магазинах выбор чуть шире – есть возможность приобрести сосиски и колбасу из злаков и бобов, вегетарианские пельмени, паштеты, растительные стейки. В России не настолько развиты вегетарианство, экоактивизм,

поэтому нет сильного влияния и навязывания потребления растительного продукта. Хотя стоит отметить, что в последние несколько лет культ здоровья, здорового питания, здорового тела усилился, и доля людей, отказавшихся от потребления мяса, возросла.

Список литературы

1. Чуб, О. П. Разработка десерта функционального назначения с использованием вторичного растительного сырья / О. П. Чуб, Д. О. Еременко // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. – 2022. – № 1. – С. 17-22.
2. Лазарь, В.Г. Соя. / В.Г. Лазарь. – М.: ООО Раритет, 2003. – 144 с.
3. Иольсон, Л.М. Соя: химия, технология и применение / Л.М. Иольсон. – Снабтехедать, 1932. – 284 с.
4. Петибская, В.С. Соя: химический состав и исследования / Под редакцией академика РАСХН, д-ра с.-х. наук В.М. Лукомцева. – Майкоп: ОАО «Полиграф – ЮГ», 2012. – 432 с.
5. Бегулов, М.Ш. Основы переработки семян сои / М.Ш. Бегулов. – М.: ДеЛи принт, 2006. – 181 с.
6. Пермякова, Л.В. Системы менеджмента безопасности пищевой продукции: учебное пособие/Л.В. Пермякова. – КемГУ.–Кемерово, 2018. – 121 с.
7. Брайен, Р.А. Жиры и масла: производство, состав и свойства, применение / Перевод с англ. под редакцией К.Д. Ключкина. – М.: Колос, 2007. – С. 26-34.
8. <https://foodandhealth.ru/>
9. Балакай, Г.Т. Соя: экология, агротехника, переработка/ Г.Т. Балакай, О.С. Безуглова.– Ростов н/Д: Феникс, 2003.–160 с.
10. Бородин, Е.А. Продукты из сои и здоровье человека/ Е.А. Бородин. – Благовещенск, 1998.– С.19–28.
11. Гниломедова, Н.В. Идентификация кристаллов тартратных солей в составе осадка вин / Гниломедова Н.В., Аникина Н.С., Весютова А.В., Олейникова В.А., Гавриш В.М., Чайка Т.В. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 3. С. 490-499.

