

ВЕСТНИК

НАУЧНЫЙ
РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ
ЖУРНАЛ

МГТУ «СТАНКИН»

Автоматизация и управление
технологическими процессами
и производствами

Технология и оборудование
механической и физико-технической
обработки

Роботы, мехатроника
и робототехнические системы

Технология машиностроения

Технологии и машины
обработки давлением



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (72) январь–март 2025

Периодичность 4 выпуска в год

Журнал основан в 2008 году

ISSN 2072-3172

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ),
включен в Перечень рецензируемых научных изданий,
рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки
и высшего образования Российской Федерации для публикации научных работ,
отражающих основное содержание диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук,
по специальностям 2.5.4 (технические науки), 2.5.5 (технические науки),
2.5.6 (технические науки), 2.5.7 (технические науки), 2.3.3 (технические науки)

© ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2025

ВЕСТНИК МГТУ «Станкин»

№ 1 (72), 2025

НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере
массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия, свидетельство ПИ № ФС77-31574 от 4 апреля 2008 г.

Председатель Редакционной коллегии

В.В. Серебранный

кандидат технических наук, доцент, ректор ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

Главный редактор

Д.Ю. Колодяжный

доктор технических наук, проректор по научной деятельности
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.М. Дмитриев

член-корреспондент РАН, доктор технических
наук, профессор, Москва, Россия

Ш. Басил

доктор технических наук, профессор, ректор
Международного университета Аль-Вади,
профессор факультета «Механика
и электротехника» Университета Аль-Баас,
Сирийская Арабская Республика

С.А. Васин

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет», Тула, Россия

В.А. Гречишников

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

А.Т. Гурьев

доктор технических наук, профессор,
ФГАОВ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет имени М.В.
Ломоносова», Архангельск, Россия

Ю.Я. Еленева

доктор экономических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

А.В. Капитанов

доктор технических наук, научный редактор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

А.А. Кутин

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

Е.Ю. Марчуков

член-корреспондент РАН, доктор технических
наук, профессор, генеральный конструктор –
директор, ОКБ им. А. Люльки – филиал ПАО
«ОДК-УМПО», Москва, Россия

А.В. Лопота

доктор технических наук, доцент, директор –
главный конструктор, Центральный научно-
исследовательский и опытно-конструкторский
институт робототехники и технической
кибернетики (ЦНИИ РТК),
Санкт-Петербург, Россия

Г.М. Мартинов

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

Б.М. Позднеев

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

М.М. Стебулянин

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

В.И. Телешевский

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

Л.А. Уварова

доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»,
Москва, Россия

© ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2025

VESTNIK MSUT «Stankin»

No 1 (72), 2025

SCIENTIFIC PEER-REVIEWED JOURNAL

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Technology
«STANKIN» (MSUT «STANKIN»)

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Compliance with Legislation in the Field of Mass Communications and Protection of Cultural Heritage, certificate PI No. FS77231574 of April 4, 2008.

Chairman of the Editorial Board

V.V. Serebrenny

cand. Sc. of Engineering, docent, rector of MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

Editor-in-chief

D.Yu. Kolodyazhny

D.Sc. of Engineering, vice-rector for scientific activity of MSUT «STANKIN»,
Moscow, Russia

EDITORIAL BOARD

A.M. Dmitriev

corresponding member of the Russian Academy
of Sciences, D.Sc. of Engineering, professor,
Moscow, Russia

Sh. Basil

D.Sc. of Engineering, professor, rector of Wadi
International University, professor at the faculty
“Mechanics and Electrical Engineering”
of Al-Baath University, Syrian Arab Republic

S.A. Vasin

D.Sc. of Engineering, professor,
Tula State University, Tula, Russia

V.A. Grechishnikov

D.Sc. of Engineering, professor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

A.T. Guryev

D.Sc. of Engineering, professor, Northern (Arctic)
Federal University named after M.V. Lomonosov,
Arkhangelsk, Russia

Yu.Ya. Eleneva

D.Sc. of Economics, professor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

A.V. Kapitanov

D.Sc. of Engineering, scientific editor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

A.A. Kutin

D.Sc. of Engineering, professor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

E.Yu. Marchukov

corresponding member of the Russian Academy
of Sciences, D.Sc. of Engineering, professor,
general designer – director, Experimental
design bureau named after A. Lyulka, branch
of Public Joint Stock Company “United
Engine Corporation – Ufa Engine Production
Association”, Moscow, Russia

A.V. Lopota

D.Sc. of Engineering, docent, director-chief
designer, Russian state scientific center
for robotics and technical cybernetics (RTC),
Saint-Petersburg, Russia

G.M. Martinov

D.Sc. of Engineering, professor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

B.M. Pozdneev

D.Sc. of Engineering, professor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

M.M. Stebulyanin

D.Sc. of Engineering, professor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

V.I. Teleshevsky

D.Sc. of Engineering, professor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

L.A. Uvarova

D.Sc. of Physics and Mathematics, professor,
MSUT «STANKIN», Moscow, Russia

© MSUT «STANKIN», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

М.А. Шереужев, Г. У, В.В. Серебряный

Вопросы разработки коллаборативной робототехнической ячейки для сборочного производства 8

А.Ю. Поливанов, Ю. Дабул

Методика определения координат сварочных стыков в системе технического зрения робота
для дуговой сварки..... 16

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*А.В. Исаев, М.Л. Исаева, Н.И. Крихели, А.М. Цициашвили,
С.Н. Григорьев, П.Ю. Перетягин*

Анализ конструктивных особенностей вращающихся режущих инструментов для
остеоденсификации в стоматологии при дентальной имплантации 26

А.Н. Соболев, А.Я. Некрасов, А.В. Ривкин

Разработка методики автоматизированного расчета и проектирования муфт Хирта
в T-FLEX CAD 39

В.А. Гречишников, Г.А. Самсоненко, А.Р. Мирзомахмудов

Повышение производительности и снижение эксплуатационных затрат при обработке трубных
резьб на основе планетарной фрезерной обработки 51

Л.Д. Малькова

Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей..... 57

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Д.Ю. Колодяжный, С.О. Черкашин, С.Г. Ляусов, В.П. Вороненко

Обеспечение требуемой точности формы длинных плоских деталей из стали ВНС-2
при плоском шлифовании за счет изменяемых параметров режимов резания
и термической обработки 66

А.С. Краско, А.В. Кислова

Методы и средства повышения производительности механической обработки деталей типа
«корпус» за счет нового подхода к планировке оборудования гибких автоматизированных участков
и оптимизации расположения стоянок транспортно-разгрузочных средств 73

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова

Исследование зависимости силы обратного выдавливания заготовок от относительных размеров ступенчатого пуансона 83

А.А. Мышечкин, В.В. Зув, Е.В. Преображенская, С.В. Скрипник

Разработка и исследование цифровым моделированием технологического процесса горячей штамповки высокопрочной колпачковой гайки 93

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

А.А. Акимов, С.Н. Григорьев

Практические аспекты разработки интеграционной платформы агрегации данных производственно-логистической системы машиностроительных предприятий 102

Д.В. Юдин, А.Н. Феофанов

Классификация припуска для создания автоматизированной системы подбора режущего инструмента 109

Е.А. Алексеев, А.Н. Ломанов

Разработка методики определения расстояния между свечениями и классификация свечений при люминесцентном контроле лопаток газотурбинных двигателей 116

СОБЫТИЯ И ДАТЫ

М.А. Волосова, В.Д. Гурин

Кафедра «Высокоэффективные технологии обработки» МГТУ «СТАНКИН»: 25 лет деятельности в сфере подготовки кадров и передовых исследований в интересах высокотехнологичных отраслей 126

CONTENTS

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

<i>M.A. Shereuzhev, G. Wu, V.V. Serebrenny</i> Issues of developing a robotic cell for assembly production.....	8
<i>A.Yu. Polivanov, Yu. Daboul</i> A method of determining the coordinates of welding joints in the robot's technical vision system for arc welding	16

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

<i>A.V. Isaev, M.L. Isaeva, N.I. Krikheli, A.M. Tsitsiashvili, S.N. Grigoriev, P.Yu. Peretyagin</i> Analysis of design of rotating cutting tools for osseodensification in implant dentistry.....	26
<i>A.N. Sobolev, A.Ya. Nekrasov, A.V. Rivkin</i> Development of a methodology for automated calculation and design of Hirth couplings in T-FLEX CAD.....	39
<i>V.A. Grechishnikov, G.A. Samsonenko, A.R. Mirzomakhmudov</i> Increasing productivity and reducing operating costs for pipe thread machining based on planetary milling	51
<i>L.D. Malkova</i> Estimation of energy consumption during machining of planes.....	57

TECHNOLOGY OF MACHINE BUILDING

<i>D.Yu. Kolodyazhny, S.O. Cherkashin, S.G. Lyapusov, V.P. Voronenko</i> Ensuring the required shape accuracy of long flat parts made of VNS-2 steel during flat grinding due to variable parameters of cutting modes and heat treatment.....	66
<i>A.S. Krasko, A.V. Kislova</i> Methods and means of increasing the productivity of machining parts of the “body” type due to a new approach to the layout of equipment for flexible automated sections and optimizing the location of parking facilities	73

TECHNOLOGIES AND MACHINES FOR PRESSURE PROCESSING

A.M. Dmitriev, N.V. Korobova
Investigation of the dependence of the force of reverse extrusion of workpieces on the relative dimensions of a stepped punch 83

A.A. Myshechkin, V.V. Zuev, E.V. Preobrazhenskaya, S.V. Skripnik
Development and research by digital modeling of the technological process of hot stamping of a high-strength cap nut 93

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES
AND PRODUCTIONS

A.A. Akimov, S.N. Grigoriev
Practical aspects of developing an integration platform for aggregating data of the production and logistics system of mechanical engineering enterprises..... 102

D.V. Yudin, F.N. Feofanov
Classification of allowance to create an automated cutting tool selection system 109

E.A. Alekseev, A.N. Lomanov
Development of a method for determining the distance between glows and classification of glows during luminescent testing of gas turbine engine blades..... 116

EVENTS AND DATES

M.A. Volosova, V.D. Gurin
Department of High-Efficiency Processing Technologies at MSUT “STANKIN”: 25 years of activity in the field of personnel training and advanced research in the interests of high-tech industries..... 126

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 8–15.

УДК 004.896

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 8–15.

М. А. Шереужев¹, Г. У², В. В. Серебрянный²¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»; ² МГТУ им. Н.Э. Баумана

✉ Автор для корреспонденции

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

При разработке коллаборативных робототехнических ячеек необходимо учитывать целый ряд вопросов. Целью данной работы является разработка технического решения для коллаборативной производственной ячейки, предназначенной для сборки выводных компонентов печатных плат в отверстия. Для достижения данной цели предложен метод, включающий декомпозицию и распределение задач в соответствии с возможностями человека и робота, а также использование онтологической базы знаний для динамического распределения задач. Также рассмотрены вопросы проектирования и интеграции системы технического зрения, способной распознавать человека и выводные компоненты.

В рамках работы представлена архитектура системы управления сотрудничеством человека и робота, которая была протестирована в симуляционной среде CoppeliaSim. Процесс выполнения задач подтвердил эффективность предложенных методов и технологий, а также продемонстрировал потенциал применения данной системы управления в сфере промышленного производства.

Ключевые слова: сотрудничество человека и робота, система управления, распределение задач, онтология, система технического зрения.

Для цитирования: Шереужев М.А., У Г., Серебрянный В. В. Вопросы разработки коллаборативной робототехнической ячейки для сборочного производства // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 8–15.

M.A. Shereuzhev¹, G. Wu², V.V. Serebrenny²¹ MSUT “STANKIN”; ² Bauman Moscow State Technical University

✉ Corresponding author

ISSUES OF DEVELOPING A ROBOTIC CELL FOR ASSEMBLY PRODUCTION

Abstract

There is a number of issues to consider when developing collaborative robotic cells. The goal of this work is to develop a technical solution for a collaborative production cell designed for assembling through-hole components of printed circuit boards into their respective holes. To achieve this goal, a method has been proposed that includes task decomposition and allocation based on the capabilities of humans and robots, as well as the use of an ontological knowledge base for dynamic task allocation. Additionally, the design and integration of a vision system capable of recognizing humans and through-hole components have been examined. This work presents the architecture of a human-robot collaboration control system, which was tested in the CoppeliaSim simulation environment. The task execution process confirmed the effectiveness of the proposed methods and technologies, as well as demonstrated the potential for applying this control system in industrial production.

Keywords: human-robot collaboration, control system, task allocation, ontology, vision system.

For citation: Shereuzhev M.A., G. Wu, Serebrenny V.V. Issues of developing a robotic cell for assembly production. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 8–15. (In Russian)

Введение

В последние годы наблюдается значительное увеличение количества коллаборативных рабочих ячеек, используемых в промышленности. Однако, проектирование и внедрение систем управления, учитывающих участие человека, остаются недостаточно проработанными. В производственных ячейках человек рассматривается как фактор неопределённости, вследствие этого, в процессе сотрудничества требуется учитывать вопросы безопасности [1]. При возникновении непредвиденных ситуаций система управления должна своевременно реагировать и принимать решения. Это подчеркивает актуальность задач, связанных с созданием новых и совершенствованием существующих технологий, обеспечивающих более активное внедрение сотрудничества человека и робота в производственные процессы.

Данное исследование направлено на оценку возможности создания коллаборативной производственной ячейки для установки выводных компонентов в отверстия печатной платы. При сборке печатной платы, представленной на *рис. 1*, коллаборативный робот, оснащенный специализированным оборудованием, автоматически выполняет установку и пайку компонентов для поверхностного монтажа [2]. Однако, компоненты должны вручную размещаться в отверстия, а затем передаваться на конвейер для выборочной пайки. Сотрудничество человека и робота способствует повышению производительности, следовательно, требуется разработка эффективного метода распределения задач [3]. В некоторых исследованиях предполагается, что человек также может рассматриваться как интеллектуальный агент, в связи с этим в мультиагентных системах распределение и перераспределение задач может осуществляться с использованием методов,



Рис. 1. Сборка печатной платы при помощи специальных автоматизированных установок

основанных на оптимизации [4], алгоритмах аукциона [5] или методах машинного обучения [6]. Во всех вышеуказанных методах учитывается гетерогенность человека и робота, такая как различия в способностях и разное время выполнения задач. Однако, в промышленных процессах способности могут изменяться [7], поэтому целесообразно осуществлять динамическое распределение задач.

Целью данного исследования является разработка коллаборативной робототехнической ячейки, предназначенной для сборочной линии печатных плат, с учетом присутствия человека и связанных с этим неопределённостей. Задачи, решаемые в данной работе:

- разработка декомпозиции задачи и распределения задачи по возможностям человека и робота;
- разработка алгоритма динамического распределения задачи с помощью онтологической базы знаний;
- разработка алгоритма обнаружения человека и компонентов печатной платы с использованием системы технического зрения;
- проведение симуляционных экспериментов на базе разработанной программной архитектуры.

Материалы и методы выполнения исследований

Общая структура системы управления сотрудничеством человека и робота представлена на *рис. 2* и состоит из модулей разбиения задач, онтологической базы знаний, планирования движения робота и сенсорного восприятия. Эти модули обеспечивают эффективное сотрудничество роботов и человека в сложных рабочих условиях.

Модуль декомпозиции задач преобразует сложные задачи в последовательность выполнимых подзадач. Онтологическая база знаний описывает типы операций, которые могут выполняться агентами, их ограничения, требования задач, а также фиксирует ключевые элементы рабочего пространства и их топологические взаимосвязи. Кроме того, база знаний взаимодействует с другими модулями, поддерживая проверку выполнимости задач и динамическое обновление состояний системы.

Модуль планирования движения робота создает оптимальные планы движения для каждого робота на основе результатов распределения задач и актуальной информации о рабочей среде. Сенсоры собирают данные о состоянии окружающей среды и системы, включая обнаружение выводных компонентов и отслеживание движений человека. Сен-



Рис. 2. Структурная схема системы управления сотрудничеством робота и человека

сорные данные, полученные в реальном времени, используются для обновления состояния системы и предоставления информации, необходимой для динамической корректировки планирования траекторий робота.

Формализация задачи планирования

В промышленной среде предпочтение отдается методам, основанным на графах, для представления и декомпозиции сложных задач. В частности, широко используется ориентированный ациклический граф, который позволяет визуализировать последовательность и взаимозависимость задач. Кроме того, он поддерживает параллельное выполнение задач, что делает его подходящим для сценариев сотрудничества человека и робота.

Рассмотрим задачу установки выводных компонентов в отверстия печатной платы, которая может быть разложена на n подзадач: T_1 – установка подставки для печатной платы; T_2 – размещение платы на подставке; T_3, T_4, \dots, T_{n-2} – установка всех разъемов; T_{n-1} – проверка качества установок всех разъемов; T_n – перенос платы на конвейер. T_3, T_4, \dots, T_{n-2} должны быть выполнены после завершения T_2 , а T_{n-1} зависит от завершения T_3, T_4, \dots, T_{n-2} .

Участниками являются оператор и коллаборативный робот. С учетом различий в возможностях робота и человека, подзадачи могут быть распределены следующим образом: T_1 назначается роботу, T_2 – человеку. Разъемы меньшего размера, такие как T_3 и T_4 , устанавливаются роботом. Разъем T_5 имеет сложную форму, как и используемый для его монтажа инструмент, поэтому его установка на плату возможна только человеком. Остальные

разъемы могут быть установлены либо человеком, либо роботом. Требуется разработка системы динамического распределения задач, которая будет определять, какому агенту поручить установку оставшихся разъемов, на основе текущего поведения человека. Качество установки всех разъемов T_{n-1} и передача печатной платы на конвейер T_n могут выполняться только человеком. Результат можно представить в виде графа, показанного на рис. 3.

Представление параметров системы с помощью онтологии

Для отслеживания выполнения задач в реальном времени и их динамического распределения необходимо разработать онтологическую базу знаний, которая предоставляет структурированную и машинно интерпретируемую модель данных. Онтология представляет собой формализованное описание знаний, состоящее из набора концепций определенной предметной области, отношений между этими концепциями, а также набора аксиом и правил, которые определяют эти концепции и их взаимосвязи.

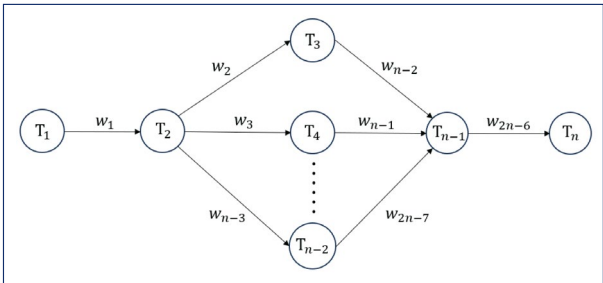


Рис. 3. Пример декомпозиции задачи в виде графа

Среда описания ресурсов используется как логический язык для представления знаний, где концепции и их отношения описываются с помощью триплетов «субъект-предикат-объект». Онтология позволяет систематизировать сущности коллаборативной производственной ячейки [8]. Типичная сущность среды может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{РАЗЪЕМ} \equiv & \text{Компонент} \wedge \text{Доступный} \wedge \text{ОбъектДляЗахвата} \wedge \text{имеетРазмер} \\ & \in [0.02, 0.03] \wedge \text{имеетПозицию} \in [0.5, 0.1, 1] \end{aligned} \quad (1)$$

База знаний, основанная на онтологиях, позволяет агентам проводить логические рассуждения на основе доступной в их базе данных информации. Процесс рассуждений может быть выражен по формуле:

$$\mathcal{F} = \{f \mid \mathcal{K} \cup \mathcal{R} \models f \wedge f \in \mathcal{Q}\}, \quad (2)$$

где \mathcal{K} – сбор фактов, \mathcal{R} – набор правил вывода, \mathcal{F} – вывод результатов, удовлетворяющих запросу \mathcal{Q} , \mathcal{Q} – условия запроса, f – логическое заключение, выведенное из базы фактов \mathcal{K} и набора правил \mathcal{R} , которое удовлетворяет условиям запроса \mathcal{Q} .

Разделение знаний на три онтологии – онтологию среды, онтологию робота и онтологию задач – способствует чёткой формализации знаний в отдельных предметных областях, облегчает их независимое обновление и обеспечивает обмен знаниями между областями с использованием семантических связей. Общая структурная онтологическая база знаний представлена на рис. 4.

Помимо определения свойств типа данных, таких как местоположение и размеры различных сущностей, необходимо также определить свойства объектов, включая «видно_кому», «доступно_для», «держит_в_руке», «расположен_над» и «назначен_кому».

Обнаружение человека и компонентов печатной платы

Система технического зрения предоставляет коллаборативной производственной ячейке возможность воспринимать изменения в окружающей среде и управлять процессом сотрудничества человека и робота. Функциональность всех модулей системы технического зрения представлена на рис. 2.

Для использования в разрабатываемой системе технического зрения была выбрана камера Kinect Xbox 360. Коллаборативная ячейка оснащена двумя камерами: одна используется для обнаружения и распознавания человека, другая – для обнаружения и распознавания выводных компонентов. В дан-

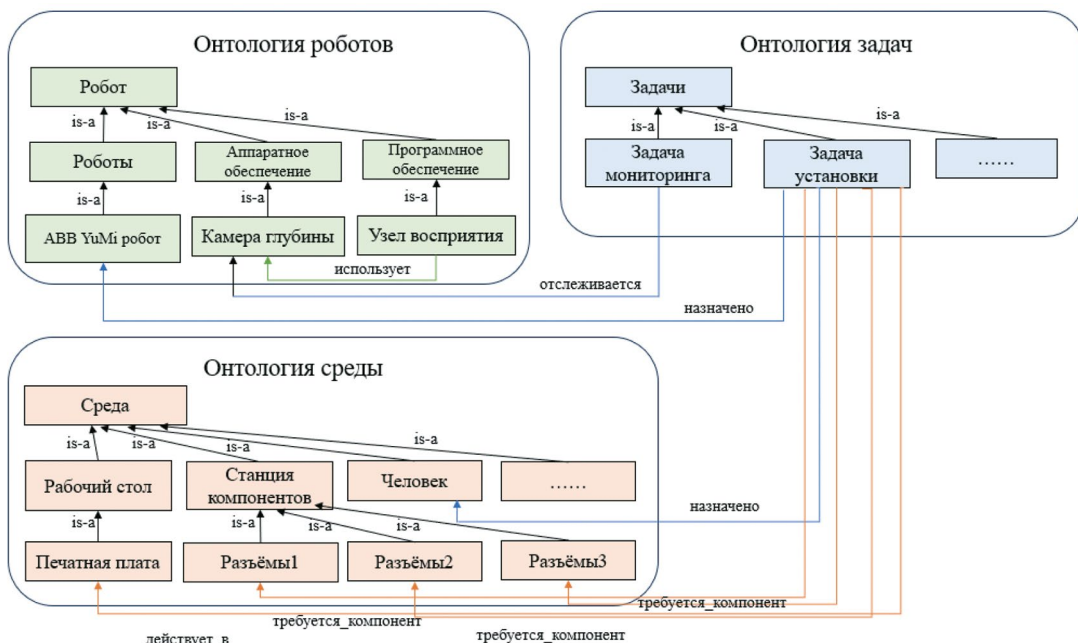


Рис. 4. Общая структурная схема онтологической базы знаний

ной работе для распознавания человека и выводных компонентов применяется детектор YOLOv5 [9], а для идентификации личности человека используется детектор OpenFace [10], выполняющий распознавание лиц. Только после обнаружения человека и подтверждения его личности робот начинает выполнять операции. Если необходимый разъем не обнаружен, робот переходит в режим ожидания до устранения проблемы.

Методология проведения эксперимента и результаты

Эксперимент проводился в симуляционной среде CoppeliaSim. Конфигурация коллаборативной роботизированной производственной ячейки и расположение всех деталей, которые необходимо собрать на рабочем столе, представлены на рис. 5. Для эксперимента использовалась модель робота ABB IRB14000 YuMi. Разъемы 1 и 2 устанавливаются на плату роботом, а разъем 4 устанавливается на плату человеком. Установка разъема 3 назначается либо человеку, либо роботу.

Для реализации работы элементов системы управления коллаборативной производственной ячейки были разработаны программные модули, которые взаимодействуют как отдельные блоки. Программная архитектура коллаборативной производственной ячейки представлена на рис. 6.

Онтологическая база знаний была разработана в программном обеспечении для редактирования онтологий Protegé и преобразована в формат “owl” с помощью библиотеки Owlready для обеспечения доступа, запросов и вывода заключений в среде Python 3. Сценарий в симуляционной среде CoppeliaSim вызывают и управляют роботом в среде Python 3 через удаленный API. Контроллер распределения задач выполняет распределение за-

дач, запрашивая состояния элементов в онтологиях задач и среды. Контроллер планирования движения использует информацию о состоянии человека и других элементов из онтологии для планирования пути робота, чтобы гарантировать отсутствие риска столкновений в процессе сотрудничества.

Перед распределением задач выполняется запрос к онтологии для идентификации выводных компонентов, необходимых для сборки печатной платы:

$$\text{find} (?obj \text{ type Component})$$
$$\Rightarrow ?obj = [Connector1, Connector2, Connector3] \quad (3)$$

Модуль вывода правила из общих знаний, например, используя информацию о том, что человек виден, а у него нет выводных компонентов в руках, чтобы сделать вывод, что человек не работает:

$$(isVisible(?ag) \wedge not(hasInHand(?ag, ?obj)))$$
$$\rightarrow not(isWorking(?ag)) \quad (4)$$

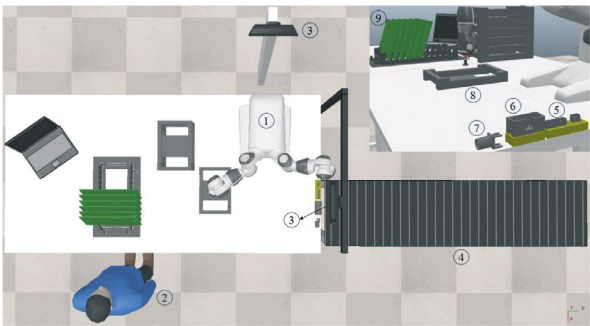


Рис. 5. Конфигурация коллаборативной ячейки:
1 – коллаборативный робот; 2 – человек;
3 – две камеры глубины; 4 – конвейер;
5 – разъемы 1 и 2; 6 – разъем 3; 7 – разъем 4;
8 – подставка печатной платы; 9 – печатная плата

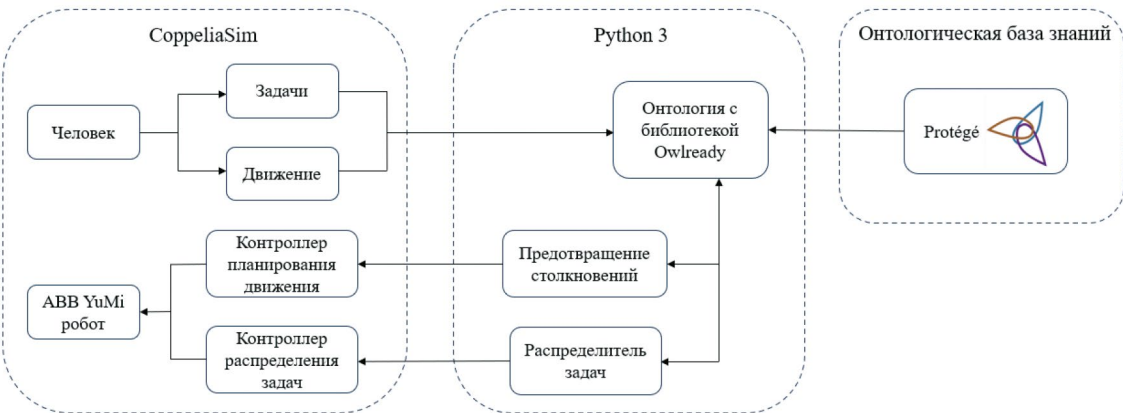


Рис. 6. Программная архитектура коллаборативной производственной ячейки

При запросе информация может быть объединена для устранения двусмысленности:

$$\begin{aligned} & find(?obj\ type\ Component; Human\ hasInHand\ ?obj) \\ \Rightarrow\ ?obj &= [Connector4] \end{aligned} \tag{5}$$

Поскольку в онтологии определены свойства типа данных, робот может запрашивать местопо-

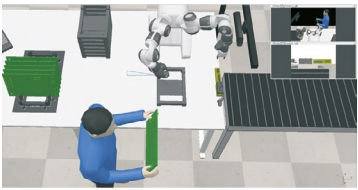
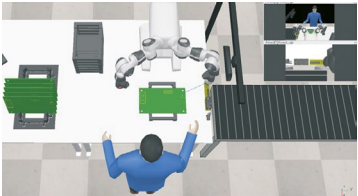
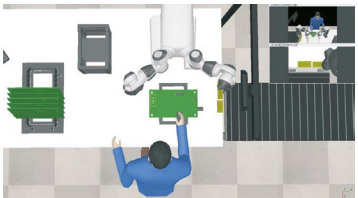
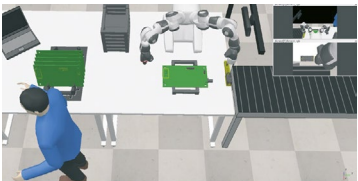
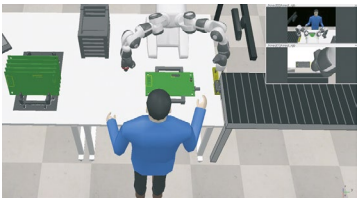
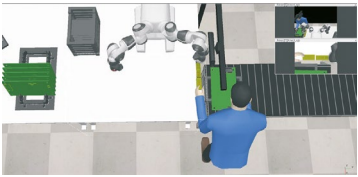
ложение выводных компонентов при планировании движения:

$$find(Connector1\ isAt\ ?loc) \tag{6}$$

В таблице представлен процесс совместной работы человека и робота при выполнении всей подзадачи. В момент времени t_1 система технического зрения воспринимает, что подставка для печатной

Таблица

Процесс совместной работы человека и робота при выполнении всей подзадачи

Время	Сценарий	Запрос онтологии	Действие
t_1		<i>Stand isVisible true Stand isReachable true Stand isOn Table Human isVisible true Human hasInHand PCB</i>	Установка подставки
t_2		<i>PCB isVisible true Connector1 isVisible true Connector1 isReachable true Connector2 isVisible true Connector2 isReachable true</i>	Установка разъемов 1 и 2
t_3		<i>Connector3 isVisible false Connector3 isReachable false</i>	Ожидание
t_4		<i>Human isVisible false Connector3 isVisible true Connector3 isReachable true</i>	Ожидание
t_5		<i>Connector3 isVisible true Connector3 isReachable true Human isVisible true Human isWorking false</i>	Установка разъема 3
t_6		<i>Human isVisible false PCB isVisible false Stand isVisible false</i>	Конец работы

платы видна и доступна на рабочем столе, человек виден и держит печатную плату, после чего вызывается планировщик задач для выполнения задачи по установке подставки. В момент времени t_2 печатная плата и разъемы 1 и 2 видны и доступны, робот выполняет установку разъемов 1 и 2. В момент времени t_3 разъем 3 не виден и недоступен, робот переходит в режим ожидания. В момент времени t_4 разъем 3 виден и доступен, но человек не виден, робот снова переходит в режим ожидания. В момент времени t_5 разъем 3 виден и доступен, человек виден, но не работает, робот выполняет установку разъема 3. В момент времени t_6 человек, печатная плата и подставка не видны, что указывает на то, что собранная печатная плата была передана на конвейер, цель считается достигнутой, робот завершает работу.

Заключение

В рамках данного исследования была разработана и протестирована система управления коллаборативной роботизированной производственной ячейкой, предназначенной для сборки выводных компонентов печатных плат в отверстия.

На основании результатов данного исследования сделаны следующие выводы:

- метод динамического распределения задач с использованием онтологической базы знаний повысил адаптивность коллаборативной производственной ячейки к изменяющимся условиям;
- система технического зрения в ходе тестов корректно распознавала целевые объекты, что обеспечило выполнение функций управления задач восприятия окружающей среды;
- эксперименты и тестирования, проведенные в симуляционной среде CoppeliaSim, подтвердили эффективность предложенных методов и технологий.

В дальнейшем предполагается разработка системы управления для коллаборативных производственных ячеек, которые смогут применяться в большем количестве промышленных производственных сценариев.

Исследование выполнено на базе МГТУ «СТАНКИН» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSFS-2024-0012).

The study was carried out at MSUT "STANKIN" with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project No. FSFS-2024-0012).

Библиографический список

1. Shereuzhev M.A., Serebrenny V.V. Industrial collaborative multi-agent systems: Main challenge // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2020. – Vol. 154. – P. 423–429.
2. Филатов С.Е. Разработка модели и метода подготовки управляющей программы станка для монтажа печатных узлов с широкой номенклатурой отечественной элементной базы // Вестник МГТУ «Станкин». – 2021. – № 2 (57). – С. 25–30. – EDN: XCDONP.
3. Serebrenny V.V., Lapin D., Mokaeva A.A. The concept of an aircraft hull structures assembly process robotization // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2171. – P. 170007.
4. Guo D. Fast scheduling of human-robot team's collaboration on synchronized production-logistics tasks in aircraft assembly // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2024. – Vol. 85. – P. 102620.
5. Wu X., Gao Z., Yuan S., Hu Q., Dang Z. A dynamic task allocation algorithm for heterogeneous UAV swarms // Sensors, 2022. – Vol. 22. – No. 6. – P. 2122.
6. Goarin M., Loianno, G. Graph Neural Network for Decentralized Multi-Robot Goal Assignment // IEEE Robotics and Automation Letters, 2024. – Vol. 9, no. 5. – P. 4051-4058.
7. Галин Р.Р., Широкий А.А., Магид Е.А., Мещеряков Р.В., Мамченко М.В. Эффективное функционирование смешанной неоднородной команды в коллаборативной робототехнической системе // Информатика и автоматизация. – 2021. – Vol. 20. – № 6. – С. 1224–1253.
8. Шереужев М. А., Девяткин Ф.В., Арабаджиев Д.И. Моделирование группового управления сельскохозяйственными роботами с использованием конечных автоматов и онтологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 6. – № 116. – С. 247–263.
9. Го У, Серебряный В.В., Шереужев М.А., Шэнь С., Чжан С. Распознавание и отслеживание механических инструментов в коллаборативной робототехнической ячейке с применением механизма внимания // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 4 (67). – С. 8–18. – DOI: 10.47617/2072-3172_2023_4_8. – EDN: SSEOGS.
10. Baltrusaitis T., Robinson P., Morency L.P. Openface: an open-source facial behavior analysis toolkit // IEEE winter conference on applications of computer vision. – 2016. – P. 1–10.

References

1. Shereuzhev M.A., Serebrenny V.V. Industrial collaborative multi-agent systems: Main challenge, *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 2020, vol. 154, pp. 423 – 429.
2. Filatov S.E. Development of a model and method for preparing a control program for a machine for assembling printed circuit boards with a wide range of domestic element base. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2021. No. 2 (57). P. 25–30. EDN: XCDONP.
3. Serebrenny V.V., Lapin D., Mokaeva A.A. The concept of an aircraft hull structures assembly process robotization, *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2171, pp. 170007.
4. Guo D. Fast scheduling of human-robot team's collaboration on synchronized production-logistics tasks in aircraft assembly. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024, vol. 85, pp.102620.
5. Wu X., Gao Z., Yuan S., Hu Q., Dang Z. A dynamic task allocation algorithm for heterogeneous UAV swarms. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 2122.
6. Goarin M., Loianno, G. Graph Neural Network for Decentralized Multi-Robot Goal Assignment. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, vol. 9, no. 5, pp. 4051–4058.
7. Galin R.R., Shirokiy A.A., Magid E.A., Meshcheryakov R.V., Mamchenko M.V. Effective functioning of a mixed heterogeneous team in a collaborative robotic system. *Computer Science and Automation*, 2021, vol. 20, no. 6, pp. 1224–1253.
8. Shereuzhev M.A., Devyatkin F.V., Arabadzhiev D.I. Modeling group control of agricultural robots using finite automata and ontologies. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2023. Vol. 6, No. 116. P. 247-263.
9. Guo Wu, Serebrennyi V.V., Shereuzhev M.A., Shen X., Zhang X. Recognition and tracking of mechanical tools in a collaborative robotic cell using the attention mechanism. *Vestnik MSUT "Stankin"*, 2023. No. 4 (67). P. 8–18. DOI: 10.47617/2072-3172_2023_4_8. EDN: SSEOGS.
10. Baltrusaitis T., Robinson P., Morency L.P. Openface: an open-source facial behavior analysis toolkit. *IEEE winter conference on applications of computer vision*, 2016, pp. 1-10.

Информация об авторах

Шереужев Мадин Артурович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Центра когнитивных технологий и машинного зрения, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
m.shereuzhev@stankin.ru

У Го – аспирант кафедры «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана
ug@student.bmstu.ru

Серебрённый Владимир Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Робототехнические системы и мехатроника», МГТУ им. Н.Э. Баумана
vsereb@bmstu.ru

Information about the authors

Shereuzhev Madin Arturovich – cand. Sc. of Engineering, research assistant at the center of “Cognitive Technologies and Machine Vision”, MSUT “STANKIN”
m.shereuzhev@stankin.ru

Wu Guo – postgraduate student at the department of “Robotic Systems and Mechatronics”, Bauman Moscow State Technical University
ug@student.bmstu.ru

Serebrenny Vladimir Valerievich – cand. Sc. of Engineering, docent, Head of the department of “Robotic Systems and Mechatronics”, Bauman Moscow State Technical University
vsereb@bmstu.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

УДК 621.865.8:005

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 16–25.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 16–25.

А.Ю. Поливанов , *Ю. Дабул*

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

 Автор для корреспонденции

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ СВАРОЧНЫХ СТЫКОВ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТА ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Аннотация

Сварка — это технологический процесс создания неразъемных соединений путем создания межатомных связей между компонентами при их нагревании, пластическом деформировании или комбинации этих двух факторов. Сварка является разновидностью сборочной операции и позволяет создавать неразъемные соединения. Она получила широкое распространение благодаря своей простоте и высокой скорости соединения деталей. Сварка является высокопроизводительным и экономически выгодным технологическим процессом, который используется во многих областях машиностроения. Процесс сварки необходимо автоматизировать. Автоматизированная сварка — это автоматизированный процесс, выполняемый с помощью специальных роботов и другого сварочного оборудования. Процесс сварки, выполняемый с помощью робота – роботизированная сварка – имеет ряд преимуществ, в том числе высокое качество готовых изделий и высокую производительность производства.


Кроме того, важным преимуществом роботизированной сварки является её точность. Погрешность позиционирования сварочной горелки современных роботов для сварки составляет 0,03–0,05 мм, что достаточно для большинства задач. Тем не менее, при жёстком программировании робота (без адаптации) погрешность позиционирования может достигать 0,5 мм и более. Для уменьшения погрешности необходимо использовать методы коррекции сварочной траектории, основанные на измерении координат сварочного стыка с помощью системы технического зрения (СТЗ). Коррекция траектории позволит обеспечить качество сварного изделия, но при этом может снизиться скорость сварки. Поэтому, для обеспечения требуемой точности сварки и сохранения приемлемой скорости, требуется разработка эффективных методов определения координат стыков сварных соединений с помощью технического зрения в составе робота для дуговой сварки.

Ключевые слова: система технического зрения, дуговая сварка, робот, стык.

Для цитирования: Поливанов А.Ю., Дабул Ю. Методика определения координат сварочных стыков в системе технического зрения робота для дуговой сварки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 16–25.

A.Yu. Polivanov , *Yu. Daboul*

MSUT “STANKIN”

 Corresponding author

A METHOD OF DETERMINING THE COORDINATES OF WELDING JOINTS IN THE ROBOT’S TECHNICAL VISION SYSTEM FOR ARC WELDING

Abstract

Welding is a technological process of creating permanent joints by creating interatomic bonds between components when they are heated, plastic deformed, or a combination of these two factors. Welding is a type of assembly operation; it allows you to create permanent joints. It has become widespread due to its simplicity

and high speed of connecting parts. Welding is a high-performance and cost-effective technological process that is used in many areas of mechanical engineering. The welding process must be automated. Automated welding is a fully automated process performed with the help of special robots and other welding equipment. Robot welding has a number of advantages, including high quality of finished products and high production productivity. In addition, an important advantage of robotic welding is its accuracy. The positioning error of the welding torch of modern welding robots is 0.03–0.05 mm, which is sufficient for most tasks. However, with hard programming of the robot (without adaptation), the positioning error can reach 0.5 mm or more. To reduce the error, it is necessary to use methods for correcting the welding trajectory based on measuring the coordinates of the welding joint using a vision system. Correction of the trajectory will ensure the quality of the welded product, but at the same time the welding speed may decrease. Therefore, in order to ensure the required welding accuracy and maintain an acceptable speed, the task arises to develop effective methods for determining the coordinates of the joints of welded joints using technical vision as part of an arc-welding robot.

Keywords: computer vision system, arc welding, robot, joint.

For citation: Polivanov A.Yu., Daboul Yu. A method of determining the coordinates of welding joints in the robot's technical vision system for arc welding. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2025. No 1 (72). P. 16–25. (In Russian)

Роботизированный технологический комплекс для дуговой сварки

Способы определения координат стыков сварного соединения

Большим преимуществом роботизированной сварки является её точность. Точность позиционирования сварочной горелки современных роботов для сварки составляет 0,03–0,05 мм, что достаточно для большинства задач сварки [14].

Тем не менее, при жёстком программировании робота (без адаптации), погрешность позиционирования может достигать 0,5 мм и более. Чтобы достичь необходимой точности позиционирования, обычно используют дорогостоящую оснастку для фиксации свариваемых элементов. Другой способ обеспечения нужной точности – коррекция сварочной траектории на основе определения координат сварочных стыков с помощью сенсорной системы.

Сенсоры для сварки в настоящее время варьируются от экономичных электродных сенсорных датчиков до новейших лазерных систем и систем технического зрения (рис. 1) [13]. Они отличаются скоростью и точностью определения координат стыков.

Датчик прикосновения через электрод (рис. 1а) эффективен для всех токопроводящих металлов и обеспечивает экономичное обнаружение швов.

Бесконтактные лазерные системы (рис. 1б) обеспечивают быстрое и точное обнаружение швов, исключая разрывы или надломы сварочной проволоки. Эти системы являются экономически эффективным вариантом между решениями тактильного и визуального контроля.

Датчик тока и напряжения сварочной дуги (рис. 1в) позволяет отслеживать шов по дуге во время сварки и совместим с оборудованием любых роботов, в том числе оснащённых другими сенсорными системами слежения за траекторией сварки.

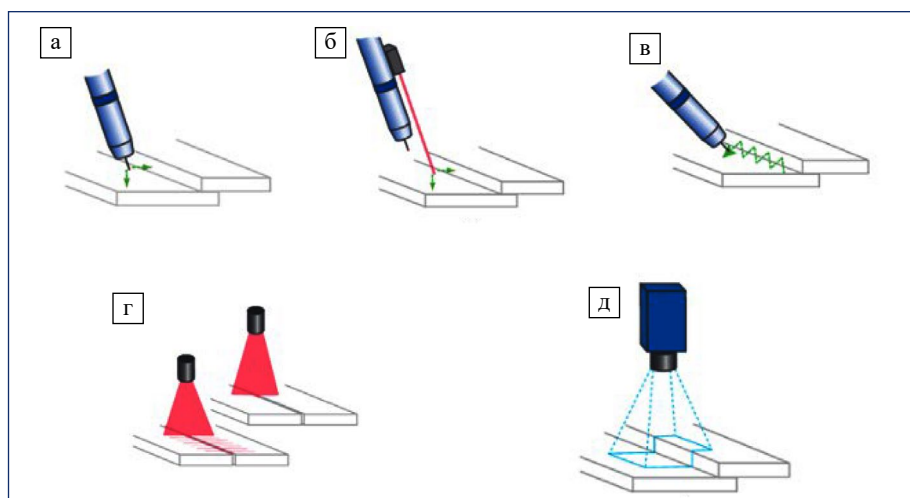


Рис. 1. Сенсорные технологии определения места сварки [13]

Лазерный поиск и отслеживание (*рис. 1з*) используется для различных материалов и условий освещения, а также для получения данных о зазорах в стыках и коррекции траектории сварки в реальном времени на основе обратной связи по зазорам в стыках

СТЗ (*рис. 1в*) позволяет идентифицировать сварочный стык и определить его координаты бесконтактным способом, и является наиболее перспективными сенсoram. СТЗ также может оценивать качество сварочного шва после сварки.

Как правило, в одном сварочном робототехническом комплексе используется несколько способов отслеживания места сварки. Датчики прикосновения через электрод совместно с датчиком тока сварочной дуги являются минимальной стандартной конфигурацией [13]. Далее, в зависимости от решаемых технологических задач и бюджета заказчика, сварочный робот оборудуется лазерным дальномером или системой технического зрения (или и тем и другим одновременно). Таким образом, сенсорные системы сварочного робота дополняют друг друга и позволяют гибко решать задачи определения и коррекции траектории сварки.

Структура робототехнического комплекса дуговой сварки

Состав робототехнического комплекса для сварки

Роботизированный комплекс сварки представляет собой систему, состоящую из многих частей, начиная от манипулятора робота и его системы управления и заканчивая системами, которые помогают управлять роботом и обслуживать его.

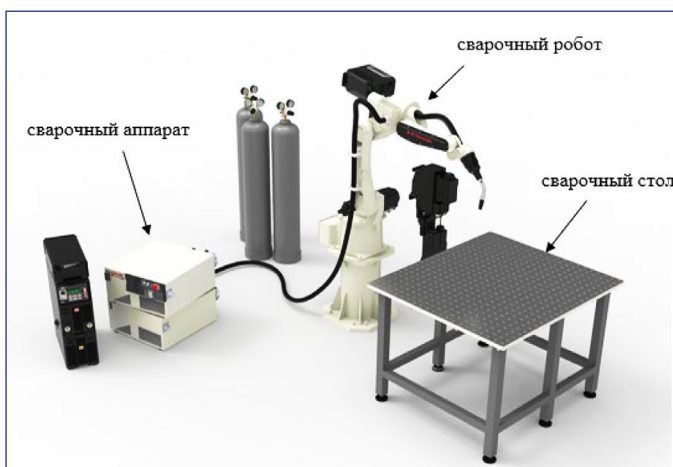


Рис. 2. Базовое решение для роботизированного сварочного комплекса

Как показано на *рис. 2*, минимальный состав роботизированного сварочного комплекса:

- сварочный робот;
- сварочный аппарат;
- сварочный стол с набором оснастки.

В зависимости от условий сварки, робототехнический комплекс может дополнительно оснащаться следующими компонентами:

- устройство, позволяющее деталям вращаться в разных плоскостях, например, одно- или двухосевые вращатели, кантователи или другие роботы;
- устройство, предназначенное для очистки горелки;
- сенсорные системы используются для поиска свариваемых компонентов, определения стыков, наблюдения за швом во время сварки и корректировки траектории сварки;
- система вентиляции;
- линейные двигатели, которые управляют движением робота или заготовки;
- программное обеспечение для программирования оффлайн.

Для сварки могут использоваться ангулярные антропоморфные роботы с пятью или шестью степенями подвижности.

Роботизированные комплексы также включают оборудование для очистки горелки, вентиляции и защитных барьеров, а также оборудование для позиционирования и перемещения изделий.

В процессе сварки брызги прилипают к горелке и загрязняют её, что нарушает процесс. Кроме того, капля, образующаяся на конце электрода, мешает дальнейшему зажиганию дуги. Таким образом, горелку необходимо регулярно чистить. Что-

бы выполнить эту задачу, роботизированные установки оборудуются станциями очистки горелки. Они удаляют брызги из сопла с помощью специальной фрезы, обрезают концы проволоки и наносят специальное антипригарное покрытие, которое снижает прилипание брызг.

В процессе роботизации сварки остаётся проблема точного и надёжного определения координат сварочного стыка, несмотря на использование современных сенсоров, которые были указаны ранее.

Перспективным сенсором для определения координат сварочного стыка является СТЗ за счёт своей универсальности и бесконтактного действия. Но применение СТЗ для сварки имеет особенности, связанные с сильно изменяющимся освещением, температурным воз-

действием и наличием брызг металла, способных повредить оптическую систему. В данной статье авторы предлагают методику, которая, позволит определять координаты сварочного стыка с требуемой точностью в условиях сильных световых помех.

1.2.2. Система управления робототехническим комплексом

Система управления робототехническим комплексом дуговой сварки является адаптивной системой с сигнальной адаптацией и замкнутой цепью самонастройки. Структурная схема адаптивной системы управления роботом KUKA для дуговой сварки приведена на рис. 3.

В системах с сигнальной (пассивной) адаптацией эффект самонастройки достигается с помощью компенсирующих сигналов без изменения параметров управляющего устройства. Адаптивные системы замкнутого типа имеют замкнутый вспомогательный контур настройки параметров. В самонастраивающихся адаптивных системах изменяются только значения параметров регулятора [16].

Адаптивная система управления роботом работает следующим образом: сигнал с камеры СТЗ поступает на устройство вычисления координат сварочного стыка, в котором в результате обработки и анализа изображения определяются текущие координаты сварочного стыка в прямоугольной системе координат, которые, в свою очередь, с помощью решения обратной задачи кинематики преобразуются в обобщенные координаты робота $Q(q_1, \dots, q_6)$.

Устройство управления роботом KRC4 сравнивает текущие программные значения обобщенных координат, и, если они отличаются от полученных координат от СТЗ, управление происходит на основе последних. В противном случае управление будет осуществляться по программной траектории без адаптации.

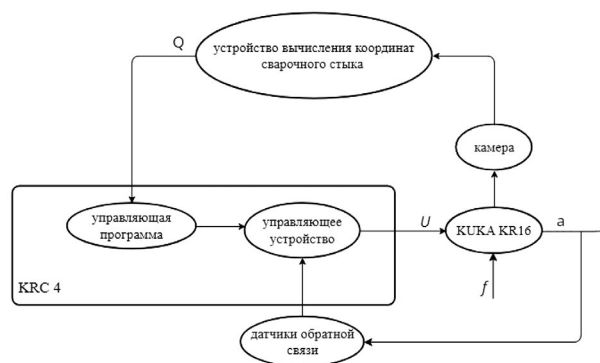


Рис. 3. Структурная схема адаптивной системы управления роботом KUKA для дуговой сварки

Программная реализация и сравнительный анализ алгоритмов определения координат шва

2.1. Выбор инструментов программирования

2.1.1. Язык программирования Python

Для исследования алгоритмов, определяющих методику определения координат сварных стыков, был использован язык программирования высокого уровня Python.

Данный язык был выбран, так как он удобен для решения подобных задач, легко изучается за счёт большого количества обучающих материалов и может работать с библиотекой OpenCV.

Разработка методики определения координат сварочных стыков проводилась под управлением операционной системы Windows, что соответствует требованиям «мягкого» реального времени. В реальных условиях те же самые алгоритмы, составляющие методику определения координат сварочного стыка, можно реализовать под управлением системы «жесткого» реального времени, например, Linux.

2.1.2. Библиотека OpenCV

OpenCV является одной из самых популярных библиотек для использования компьютерного зрения.

OpenCV — библиотека с открытым кодом алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения. Используется C/C++, но также доступны версии для Python, Java, Ruby, Matlab, Lua и других языков. Она разрабатывалась сначала в Intel, а затем в Itseez при активном участии общественности с 1998 года.

Библиотеку можно свободно и бесплатно использовать как в закрытых, так и в открытых проектах, поскольку она распространяется по открытой лицензии.

Исследование работы алгоритмов определения координат сварного шва

Рассматриваемые в данной работе методы определения координат стыков в системе технического зрения сварочного робота основаны на алгоритмах обработки изображений. Они реализуются как процессы обработки, на вход которых подаётся изображение, а на выходе выдаются координаты сварочного стыка.

Авторами была составлена базовая общая структура алгоритма определения координат сварочного стыка двух деталей (рис. 4).

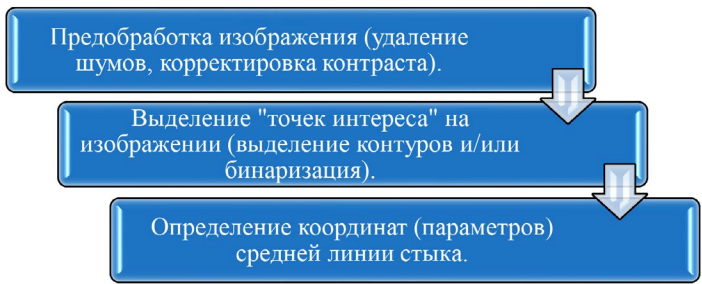


Рис. 4. Общая структура алгоритма определения координат сварочного стыка

Была проведена серия пробных испытаний отдельных инструментов обработки изображений. В результате, для определения координат средней линии стыка было решено использовать преобразование Хафа. Этот инструмент показал очень хорошие результаты, при условии качественного выполнения предыдущих двух этапов обработки (удаления шумов и выделения области интереса) [9].

Таким образом, акценты в определении координат стыка сместились на уровень предобработки изображения и выделения области интереса.

Было проведено исследование, в котором были использованы операторы из библиотеки Open CV в различных комбинациях для получения лучшего результата по определению координат сварочного стыка. Для этого была составлена схема выбора алгоритмов определения координат стыка (рис. 5).

Исходя из принятой условной нумерации блоков инструментов-операторов обработки изображений, каждому алгоритму был присвоен свой уникальный шифр. Этот шифр несёт информацию о последовательности применения тех или иных операторов обработки изображений.

Например, А-0-1-3.3-4.1-6-7 обозначает А-алгоритм обработки исходного растрового изображения в следующем порядке: перевод в полутоновое, фильтрация шумов двусторонним фильтром, бинаризация с адаптивным порогом, преобразование Хафа, построение линии по полученным параметрам и оценка метода по критериям: быстродействие, точность, устойчивость к шумам.

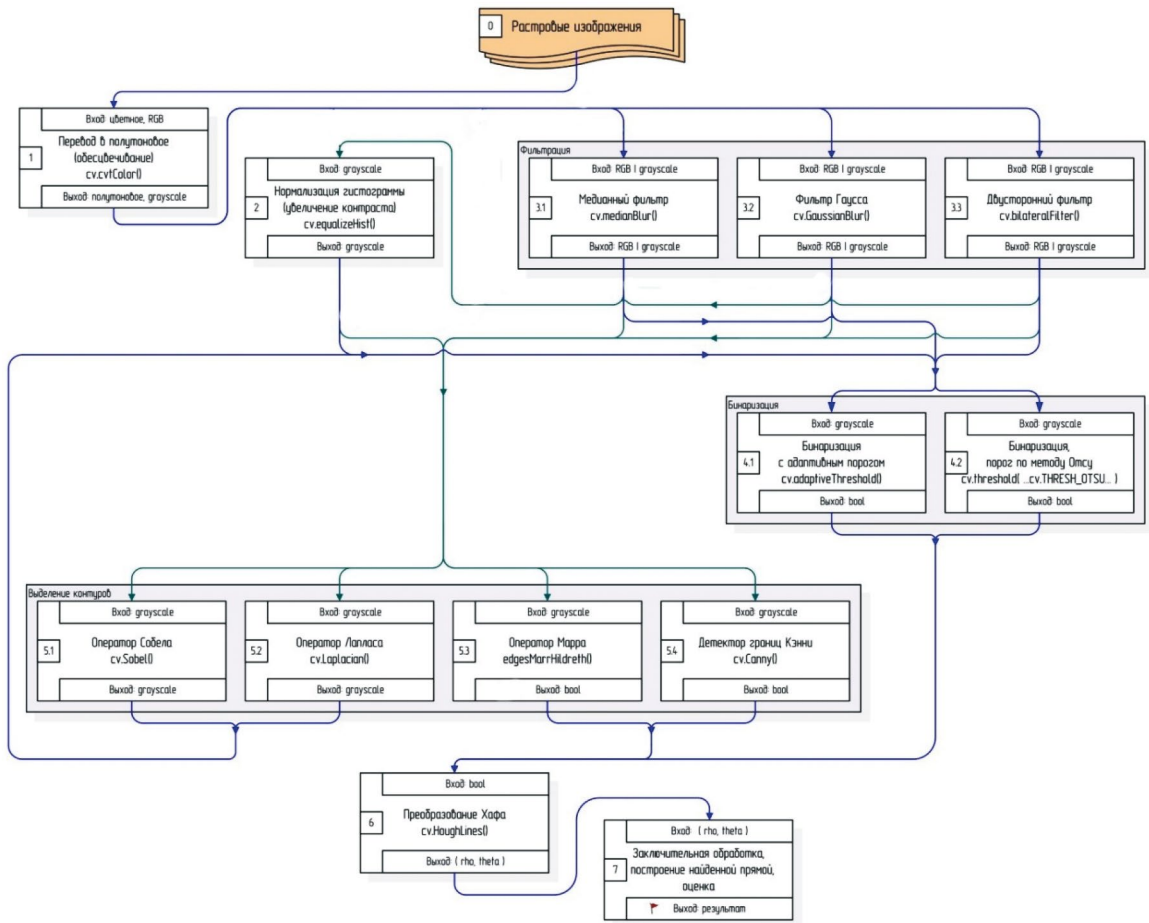


Рис. 5. Схема выбора алгоритмов определения координат стыка

Предложенные варианты алгоритмов определения координат сварочного стыка были протестированы с помощью разработанной программы обработки изображений на заранее подготовленных изображениях, моделирующих вид стыка двух деталей.

4. Результаты работы алгоритмов распознавания стыка деталей на изображении

На рис. 6, 7, 8, 9 показаны результаты работы алгоритмов определения координат сварочных сты-

ков. Слева сверху приведено изображение реального сварочного стыка, справа снизу – линия сварочного стыка (обозначена зеленым цветом), полученная в результате обработки координат точек сварочного стыка преобразованием Хафа. Характеристики этой линии определяются значениями параметров θ и ρ , которые показаны на рис. 10. Значения θ и ρ , полученные в результате обработки изображения сварочного стыка разными алгоритмами, представлены в таблице.

Таблица содержит результаты обработки изображений сварочного стыка различными алгорит-

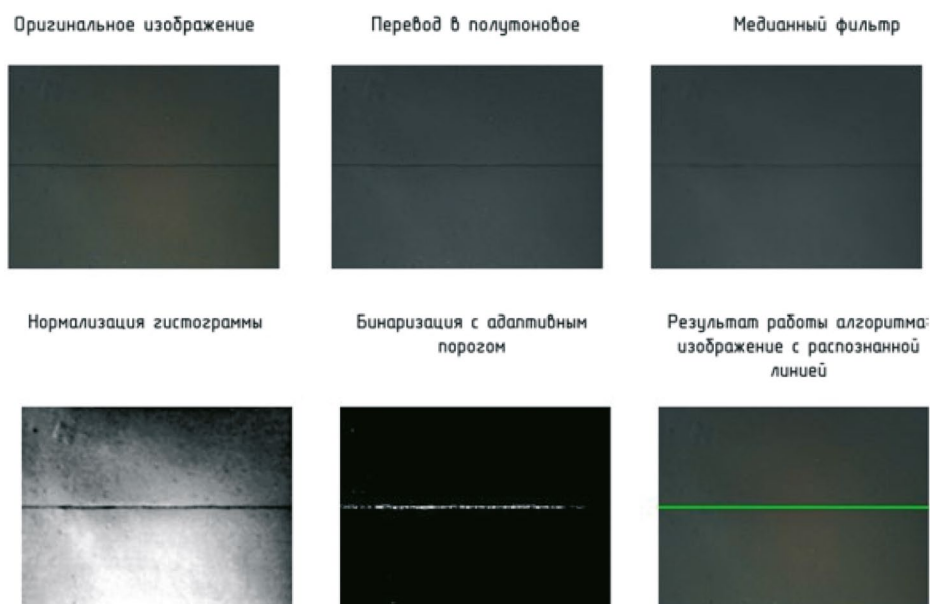


Рис. 6. Результаты работы алгоритма А-3.1-2-4.1

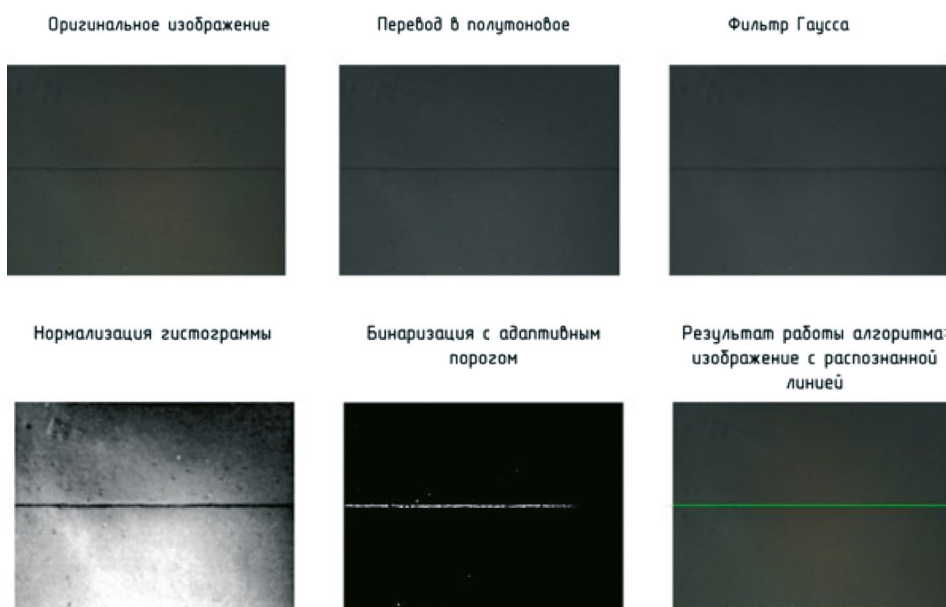


Рис. 7. Результаты работы алгоритма А-3.2-2-4.1

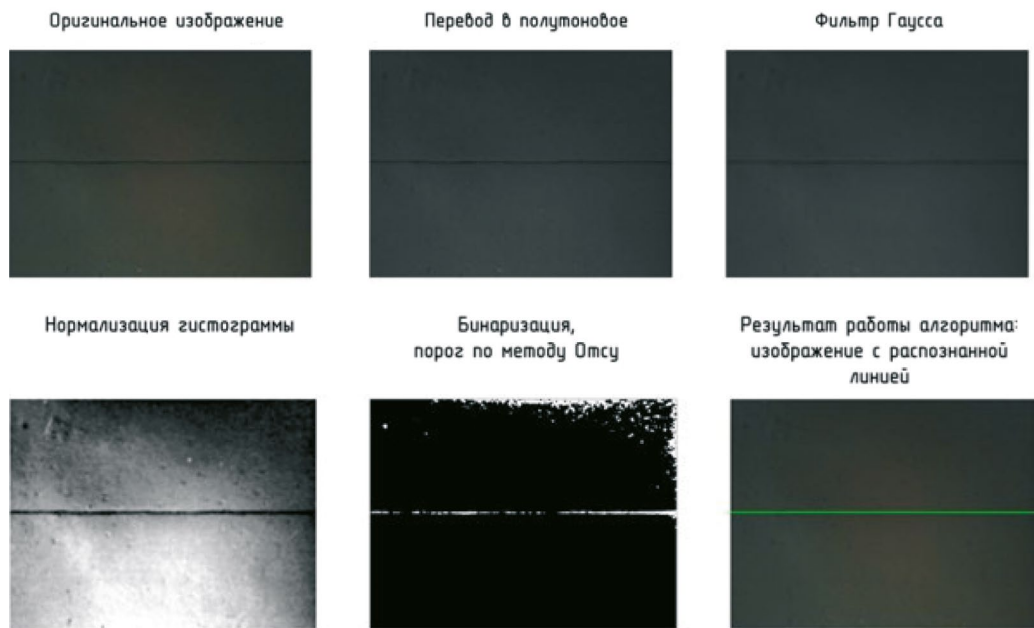


Рис. 8. Результаты работы алгоритма А-3.2-2-4.2

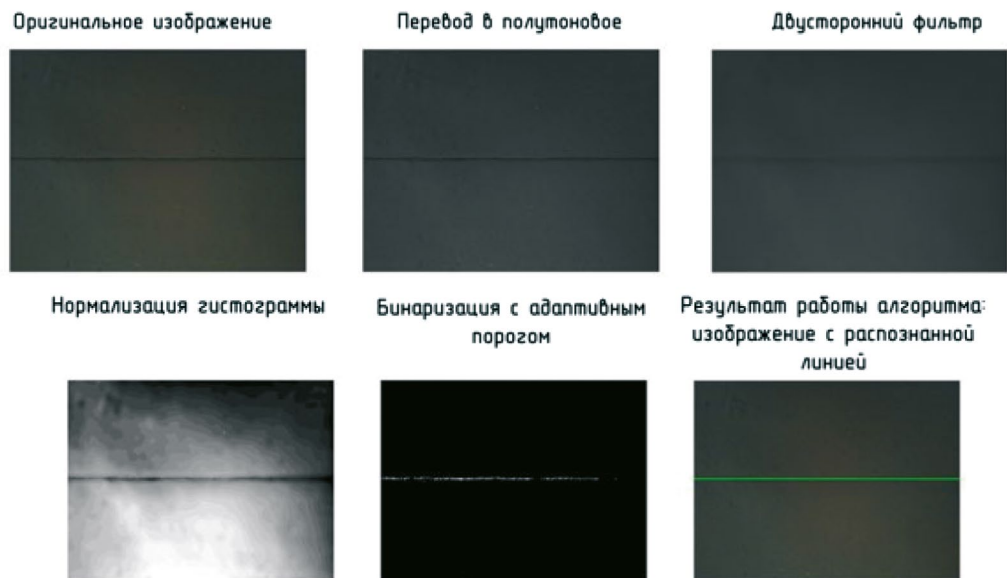


Рис. 9. Результаты работы алгоритма А-3.3-2-4.1

мами. В ней приведены результаты преобразования Хафа θ и ρ , время работы алгоритма и координаты характерных точек А и В, которые задают линию сварочного стыка и передаются в систему управления роботом. Координаты этих точек определяются в соответствии с *рис. 10*.

В *таблице* знаком «+» отмечены алгоритмы, которые могут быть использованы для определения координат сварочных стыков. Пригодность алгоритма определяется его возможностью корректно распознавать сварочный стык и определять координаты его характерных точек.

Алгоритмы, которые отмечены знаком «-», не распознали сварочный стык или неправильно определили характерные точки.

Реальная погрешность определения координат сварочного стыка (точки А, В) зависит от характеристик камеры, объектива, погрешности преобразования координат и способа закрепления камеры (на роботе, над роботом). Разрабатывая методику, авторы не имели возможности провести полноценный эксперимент.

Таблица

Результаты обработки изображений сварочного стыка различными алгоритмами

Алгоритм, шифр	Пригодность алгоритма	Показатели			Координаты точек линии сварочного стыка (мм)			
		rho, пикселей	theta, рад.	время, с	X _A	Y _A	X _B	Y _B
A-31-54	+	1,498	0,0028	0,097	1.4788	0.0042	1.494	1.502
A-32-53	+	1,218	0,0028	6,089	1.218	0.0034	1.214	1.222
A-32-54	+	64,253	0,1599	0,065	63.43	10.23	53.20	73.63
A-33-54	-	65,387	0,3098	0,082	62.274	19.93	42.37	82.19
A-31-2-41	+	20,229	0,0261	0,061	20.222	0.528	19.70	20.75
A-31-2-42	-	238,418	0,0098	0,071	238.41	2.336	236.0	240.8
A-32-2-41	+	1,853	0,0028	0,055	1.853	0.0052	1.85	1.86
A-32-2-42	+	122,053	0,0063	0,046	122.05	0.769	121.2	122.8
A-33-2-41	+	91,853	0,1599	0,182	90.68	14.624	76.05	105.3
A-33-2-42	+	65,053	0,1001	0,070	64.727	6.501	58.22	71.23
A-31-2-54	+	1,598	0,0028	0,073	1.598	0.0045	1.593	1.603
A-32-2-54	+	0,853	0,0028	0,050	0.853	0.0024	0.85	0.856
A-31-51-42	+	1,450	0,0028	0,067	1.45	0.0041	1.446	1.454
A-32-51-41	+	1,253	0,0028	0,044	1.253	0.0035	1.25	1.257
A-32-51-42	+	1,020	0,0028	0,080	1.02	0.0029	1.017	1.023
A-32-52-42	+	1,429	0,0028	0,045	1.43	0.004	1.425	1.433
A-33-52-41	-	229,622	0,4776	0,209	203.93	105.55	98.28	309.5
A-33-52-42	-	202,383	0,4704	0,239	180.40	91.729	88.64	272.3
A-31-2-51-41	+	109,214	0,3134	0,141	103.89	33.67	70.22	137.6
A-32-31-2-54	+	0,853	0,0028	0,068	0.853	0.0024	0.85	0.856

На основе анализа источника [9] авторы предполагают, что использование метода Хафа позволит определить координаты характерных точек с погрешностью меньшей, чем один пиксель.

Выбирая соответствующую оптику камеры, можно изменять размер рабочей зоны наблюдения сварочного стыка. На основе анализа литературных источников [12-14, 16] предлагается использовать рабочую зону 30x30 мм и разрешение камеры 1024x1024. В этом случае получается следующая погрешность измерения: 30мм/1024=0,029 мм.

Это соответствует допустимой погрешности, которая была указана вначале – 0,03...0,05 мм. Погрешность при необходимости можно уменьшить за счёт уменьшения поля зрения или увеличения разрешения камеры.

На рис. 10 показано определение координат точек А, В по параметрам преобразования Хафа θ

и ρ . Формулы (1) выражают эту зависимость аналитически.

$$\begin{aligned}
 x_A &= \rho \cos \theta \\
 y_A &= \rho \sin \theta \\
 x_A = C + x_B &\Rightarrow x_B = x_A - C \\
 C = \rho \sin \theta &\Rightarrow x_B = \rho(\cos \theta - \sin \theta) \\
 y_B = D + y_A &= \rho \cos \theta + \rho \sin \theta = \rho(\sin \theta + \cos \theta)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Исходя из полученных данных, лучшие результаты, на заданной выборке из пяти изображений показали следующие алгоритмы распознавания и определения координат стыка:

- **A-32-2-54:** перевод в полутоновое изображение при 256 градациях серого, фильтрация шумов фильтром Гаусса, нормализация гистограммы, детектор границ Кэнни, преобразова-

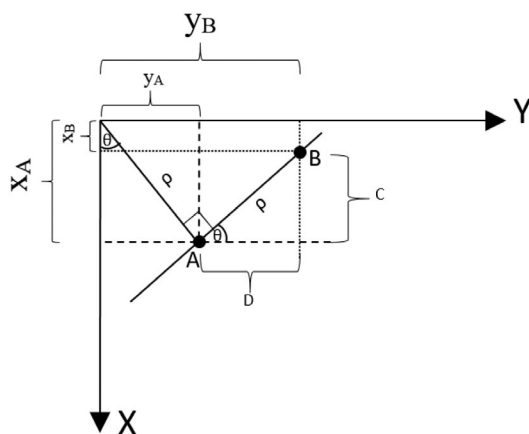


Рис. 10. Определение характерных координат точек сварочного стыка на основе преобразования Хафа

ние Хафа, построение линии по полученным параметрам и оценка метода.

- **А-32-51-42:** перевод в полутоновое изображение при 256 градациях серого, фильтрация шумов фильтром Гаусса, оператор Собела, бинаризация с порогом по методу Отсу, преобразование Хафа, построение линии по полученным параметрам и оценка метода.
- **А-32-31-2-54:** перевод изображения в изображение при 256 градациях серого, фильтрация шумов фильтром Гаусса (17×17), фильтрация медианным фильтром (11×11), нормализация гистограммы, детектор границ Кэнни (пороги 48 и 160, ядро 3), преобразование Хафа (порог аккумулятора 184), на выходе два значения параметров (ρ_1, θ_1) и (ρ_2, θ_2) , определяющих две параллельные линии, ограничивающие контуры распознанного стыка деталей. Из них вычисляем параметры средней линии стыка: $\left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2}, \theta \right)$.

Заключение

В работе решена задача по разработке методики определения координат сварочного стыка в СТЗ промышленного робота на основе преобразования Хафа. В результате, разработанная методика содержит алгоритмы, которые позволяют за минимальное время (50 мс) распознать сварочный стык и определить его координаты по двум характерным точкам. Надежность распознавания подтверждается корректным распознаванием сварочных стыков и определением его координат в серии из 15 опытов с разными изображениями сварочных стыков на основе алгоритма А-32-2-54.

В результате выполненной работы было разработано программно-алгоритмическое обеспечение на языке Python с использованием библиотеки Open CV. Разработанное программное обеспечение может быть использовано в сварочных роботах с СТЗ.

Библиографический список

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение / Учебное пособие для студентов вузов – М.: Машиностроение, 2006.
2. Поливанов А.Ю., Иванов Ю.В., Холин Д.В. Калибровка видеосенсора системы технического зрения промышленного робота для лазерной сварки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2019. – № 2 (49). – С. 119–126. – EDN: XCLZLH.
3. Поливанов А.Ю., Иванов Ю.В., Холин Д.В. Методика преобразования координат системы технического зрения промышленного робота для операции лазерной сварки // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020/ – № 21(3). – С. 166–173.
4. Зенкевич С.Л. Основы управления манипуляционными роботами: учебн. для ВУЗов. 2-е изд. исправ. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
5. K.S. Fu., R.C. Gonzalez, C.S.G. Lee. Robotics: control, sensing, vision and intelligence. – McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.
6. Mahidzal Dahari, Jian-Ding Tan. Forward and inverse kinematics model for robotic welding process using KUKA KR16 robot, 2011.
7. Яне Б. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
8. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
9. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р., М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
10. Калибровка камеры с использованием OpenCV [Электронный ресурс] // URL: <https://waksoft.susu.ru/2020/02/29/kalibrovka-kamery-s-ispolzovaniem-opencv.html> (дата обращения 11.12.23).
11. Анализ методов калибровки стереоскопических камер [Электронный ресурс] // URL: <https://studopedia.org/13-37634.html> (дата обращения 12.12.23).
12. Виды роботизированной сварки [Электронный ресурс] // URL: <https://robomatic.ru/content/vidy-robotizirovannoy-svarki.html> (дата обращения 12.12.23).
13. Сварочные швы // URL: <https://proflasermet.ru/article/svarochnye-shvy.html> (дата обращения 06.10.23).

14. Особенности применения роботизированных комплексов в сварке // URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/osobennosti-primeneniya-robotizirovannykh-kompleksov-v-svarke.html> (дата обращения 07.12.23).

15. Калибровка шестизвенных манипуляторов универсальных промышленных роботов // URL: <http://forum.russ2.com/lofiversion/index.php/t1133.html> (дата обращения 12.11.23).

16. Сварочная система Kemppi A7 MIG Welder 450 // URL: <https://www.kemppi.com/ru/offering/family/a7-mig-welder/> (дата обращения 29.10.23).

References

1. Poduraev Y.V. Mechatronics: fundamentals, methods, application. Textbook for university students – M.: Mechanical engineering, 2006.

2. Polivanov A.Yu., Ivanov Yu.V., Kholin D.V. Calibration of the video sensor of the technical vision system of an industrial robot for laser welding. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2019. No. 2 (49). P. 119–126. EDN: XCLZLH.

3. Polivanov A.Yu., Ivanov Yu.V., Kholin D.V. Method for converting coordinates of the computer vision system of an industrial robot for laser welding operations. *Mechatronics, automation, control*. 2020. Vol. 21(3). P. 166–173.

4. Zenkevich S.L. Fundamentals of control of manipulation robots: Textbook for universities. 2nd ed. corrected and additional M.: Publishing MSTU im. N.E. Bauman, 2004, P. 480.

5. K.S. Fu., R.C. Gonzalez, C.S.G. Lee. Robotics: control, sensing, vision and intelligence. McGraw-Hill Book Company, New York, 1987.

6. Mahidzal Dahari, Jian-Ding Tan. Forward and inverse kinematics model for robotic welding process using KUKA KR16 robot, 2011.

7. Yane B. Digital image processing. M.: Technosphere, 2007, P. 584.

8. Yurevich E.I. Basics of robotics. 2nd ed. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2005, P. 416.

9. Gonzalez R. Digital image processing / Gonzalez R., Woods R. M.: Technosphere, 2012. P. 1104.

10. Calibrating camera using OpenCV [Electronic resource] // URL: <https://waksoft.susu.ru/2020/02/29/kalibrovka-kamery-s-ispolzovaniem-s-opencv.html> (visiting date 11.12.23).

11. Analysis of stereoscopic camera calibration methods [Electronic resource] // URL: <https://studopedia.org/13-37634.html> (visiting date 12.12.23).

12. Types of robotic welding [Electronic resource] // URL: <https://robomatic.ru/content/vidy-robotizirovannoy-svarki.html> (visiting date 12.12.23).

13. Welding seams // URL: <https://proflasermet.ru/article/svarochnye-shvy.html> (visiting date 06.10.23).

14. Features of the use of robotic complexes in welding // URL: <https://www.shtorm-its.ru/info/articles/osobennosti-primeneniya-robotizirovannykh-kompleksov-v-svarke.html> (visiting date 07.12.23).

15. Calibrations of six-point manipulators of universal industrial robots // URL: <http://forum.russ2.com/lofiversion/index.php/t1133.html> (visiting date 12.11.23).

16. Kemppi A7 MIG Welder 450 welding system // URL: <https://www.kemppi.com/ru/offering/family/a7-mig-welder.html> (visiting date 29.10.23).

Информация об авторах

Поливанов Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
shpoliv@mail.ru

Дабул Юсеф – аспирант кафедры робототехники и мехатроники, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
youssefdaboal@hotmail.com

Information about the authors

Polivanov Alexander Yurievich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Robotics and Mechatronics”, MSUT “STANKIN”
shpoliv@mail.ru

Daboul Yousef – postgraduate student at the sub-department of “Robotics and Mechatronics”, MSUT “STANKIN”
youssefdaboal@hotmail.com

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

А.В. Исаев¹ ✉, М.Л. Исаева², Н.И. Крихели³, А.М. Цициашвили³, С.Н. Григорьев¹, П.Ю. Перетягин¹

¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»»; ² ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр оториноларингологии ФМБА России»; ³ ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России

✉ Автор для корреспонденции

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ОСТЕОДЕНСИФИКАЦИИ В СТОМАТОЛОГИИ ПРИ ДЕНТАЛЬНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Аннотация

Остеоденсификация – это инновационная хирургическая техника, основанная на т. н. аддитивном (уплотняющем) сверлении с помощью специальных сверл. Сверла для остеоденсификации должны работать по часовой стрелке для сверления в кости – остеотомии, таким образом формируя ложе для дентального имплантата, и против часовой стрелки для уплотнения стенок ложа. Из литературы известно, что для этих целей сверла имеют определенные конструктивные особенности, такие как коническая форма наружного контура, увеличенное количество спиральных канавок и отрицательный передний угол на периферийной части. Однако взаимосвязь конструктивных параметров данных сверл с показателями эффективности хирургической операции описаны в литературе недостаточно. Целью настоящего исследования является всесторонний анализ инженерных и медицинских требований к сверлам для остеоденсификации. В результате проведенного анализа представлена структурная модель типовой конструкции сверла для остеоденсификации в виде гиперграфа. Впервые представлена структура функциональных связей между конструктивными параметрами сверл для остеоденсификации, условиями выполнения операции и показателями качества операции. Результаты, представленные в настоящей статье, возможно, послужат основанием для будущих научно-исследовательских работ, которые должны быть посвящены экспериментальному определению функциональных связей между конструктивными параметрами сверл и качественными показателями хирургической процедуры. Это поможет в дальнейшем усовершенствовать конструкцию сверл для остеоденсификации, обоснованно сформировать технические требования для их производства на российских предприятиях, что необходимо для удовлетворения потребностей медицинской отрасли, повышения эффективности хирургического вмешательства и, в конечном итоге, удовлетворенности пациентов.

Ключевые слова: дентальный имплантат, стоматологические режущие инструменты, медицинские инструменты, остеоденсификация, проектирование медицинских режущих инструментов.

Для цитирования: Исаев А.В., Исаева М.Л., Крихели Н.И., Цициашвили А.М., Григорьев С.Н., Перетягин П.Ю. Анализ конструктивных особенностей вращающихся режущих инструментов для остеоденсификации в стоматологии при дентальной имплантации // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 26–38.

A.V. Isaev¹✉, M.L. Isaeva², N.I. Krikheli³, A.M. Tsitsiashvili³, S.N. Grigoriev¹, P.Yu. Peretyagin¹

¹ MSUT “STANKIN”; ² The National Medical Research Center for Otorhinolaryngology of the Federal Medico-Biological Agency of Russia; ³ Russian University of Medicine

✉ Corresponding author

ANALYSIS OF DESIGN OF ROTATING CUTTING TOOLS FOR OSSEODENSIFICATION IN IMPLANT DENTISTRY

Abstract

Osseodensification is an innovative surgical instrumentation technique based on additive (non-cutting) drilling using special burs. The osseodensification burs should operate in a clockwise direction to drill holes and in a counterclockwise direction to compact the osteotomy walls. For these purposes, the burs have special design features, like conical contour shape, increased number of helical flutes and negative rake angle on their peripheral part. However, although other parameters and features of the burs define their overall performance, they are not described sufficiently, and their influence on the surgical quality is almost unknown both for clinicians and tool manufacturers. The purpose of the present research is to identify the key design features of burs for osseodensification and their functional relationship with the qualitative indices of the procedure basing on analytical review of research papers and patent documents. It will help to further improve the design of osseodensification burs and thereby enhance the surgical quality and, ultimately, patient satisfaction. Results: The most important design features and parameters of osseodensification burs are identified. Thereon, the structural model of osseodensification bur is first represented as a hypergraph. Basing on the analysis of previous researches, functional relationships between design parameters of osseodensification burs, osseodensification procedure conditions and procedure performance data were established and for the first time described in the comprehensive form of a hypergraph. Conclusion: This study provides formal models that form the basis of database structure and its control interface, which will be used in the later developed computer-aided design module to create advanced types of burs under consideration. These models will also help to make good experimental designs used in studies aimed at improving the efficiency of osseodensification procedure.

Keywords: dental implant, dental cutting tools, medical instrumentation, osseodensification, design of medical cutting tools.

For citation: Isaev A.V., Isaeva M.L., Krikheli N.I., Tsitsiashvili A.M., Grigoriev S.N., Peretyagin P.Yu. Analysis of design of rotating cutting tools for osseodensification in implant dentistry. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 26–38. (In Russian)

Введение

Стабильность дентальных имплантатов является важнейшим фактором для достижения остеоинтеграции [1]. Для формирования ложа дентального имплантата обычно проводят остеотомию путем сверления с использованием вращающегося режущего инструмента или используют пьезоэлектрический аппарат [2]. Наиболее широко используемым методом является сверление. Сверление включает в себя формирование отверстия путем резания костной ткани острыми лезвиями вращающегося инструмента и извлечение ткани из зоны сверления с помощью спиральных канавок [3]. Таким образом создается ложе дентального имплантата, в которое вводится имплантат. При т. н. традиционном сверлении кость удаляется из ложа в основном в виде

мелкой стружки. Однако сверление может снизить стабильность имплантата и его прочность на выдергивание из ложа [4]. Теплообразование и вибрации также являются недостатками сверления, которые могут нарушить геометрическую точность ложа и привести к клиническим осложнениям [5].

С недавнего времени в клиническую практику внедрена инновационная техника, устраняющая недостатки традиционного сверления, получившая название «остеоденсификация» [6]. Остеоденсификация – это методика, при которой костная ткань уплотняется сжимающим усилием, возникающим при обратном вращении инструмента, что позволяет повысить плотность костных стенок ложа дентального имплантата, тем самым обеспечив ему большую первичную стабильность, измеряемую в Н/см³ [7]. В отличие от традиционного сверления, процесс

остеодеңсификации считается аддитивным процессом, так как при нем происходит уплотнение кости в стенках формируемого остеоотомического отверстия – ложа дентального имплантата [8].

В целом, метод остеодеңсификации может применяться при планировании дентальной имплантации в различных клинических ситуациях: в зонах с низкой плотностью кости, при дефиците альвеолярной кости в области отсутствующих зубов в дистальных отделах верхней челюсти, дефиците альвеолярной кости в горизонтальном направлении в области отсутствующих зубов и немедленной установке дентального имплантата в лунку удаленного зуба [9]. В настоящее время широко используются сверла для остеодеңсификации Densah® фирмы Versah® (США), которые, как сообщается в литературе, дают наилучшие результаты при работе с костью низкой плотности, например, при подготовке ложа для установки дентальных имплантатов в области отсутствующих зубов на нижней или верхней челюсти [10]. Сверла для остеодеңсификации повышают плотность кости вокруг дентальных имплантатов, но не дают заметного прироста в вертикальном направлении в ложе дентального имплантата по сравнению с остеоотомами [11].

Для остеодеңсификации используют набор из специальных конических сверл, которые могут работать в двух направлениях: по часовой стрелке (для сверления) или против часовой стрелки (без резания) для уплотнения кости. Разработка, изготовление и улучшение эксплуатационных возможностей таких медицинских режущих инструментов являются перспективными и крайне важными задачами для медицинской промышленности не только для стоматологии, но и при освоении технологии производства могут быть внедрены и в других направлениях медицинской практики.

Анализ научно-технической литературы

В настоящей работе дан всесторонний анализ наиболее существенных особенностей сверл для остеодеңсификации. Обзор проведен с использованием библиографических баз данных Scopus, ScienceDirect и PubMed. По данным ScienceDirect, количество статей с ключевым словом «osseodensification» увеличилось как минимум в 10 раз с 2016 года, когда данная методика была впервые представлена авторами Huwais и Meyer [5] (рис. 1). Это говорит о растущей востребованности данного вида операции и инструмента для ее проведения.

Кроме того, рассмотрен ряд патентных документов, относящиеся к конструкциям стоматологических сверл, боров и бормашин. Все патентные документы имеют техническим результатом повышение эффективности хирургического вмешательства. Для достижения этой цели в патентах рассматривается повышение износостойкости рабочей части [12], изменение геометрии режущих кромок бора [13], другие усовершенствования конструкции бора [14]. Отдельная группа патентных документов описывает инновационные конструктивные особенности сверл для остеодеңсификации и протокол работы с ними [15, 16].

Лишь в нескольких источниках (в основном в патентах) приводятся рекомендуемые значения конструктивных параметров сверл для остеодеңсификации. Кроме того, следует признать, что вопрос о функциональных связях между конструктивными параметрами сверл для остеодеңсификации и основными показателями эффективности этой операции еще недостаточно изучен. Поэтому необходимо провести дополнительные исследования для подтверждения обозначенных связей. Настоящая работа должна стать основой для всестороннего изучения сверл для остеодеңсификации как с инженерной, так и с медицинской точки зрения.

Наиболее важным требованием к медицинским режущим инструментам, используемым при хирургических вмешательствах, является их вы-

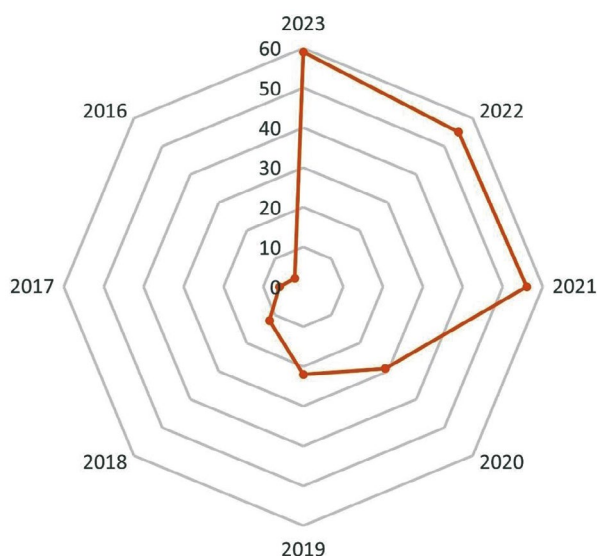


Рис. 1. Количество научных публикаций в результатах поиска публикаций по ключевым словам «osseodensification» и связанные с ним с 2016 года по настоящее время

Получено по данным ScienceDirect

сокое качество, которое может быть оценено по показателям эффективности и безопасности [17]. Эти показатели в значительной степени зависят от материала и геометрии рабочей части. Основными геометрическими характеристиками являются размеры и ориентация режущих лезвий, расположенных определенным образом на корпусе инструмента. В то же время конструктивные параметры инструмента оказывают существенное влияние на качественные показатели хирургической операции. При разработке или выборе режущего инструмента, как правило, в первую очередь производится обоснованный выбор материала рабочей части.

Материалы, используемые для изготовления хирургических режущих инструментов

В процессе хирургической операции рабочие поверхности медицинских режущих инструментов подвергаются интенсивным изгибающим и сжимающим нагрузкам, а также трению, испытывают пластическую деформацию, хрупкое разрушение и сколы в среде коррозионно-активных и поверхностно-активных веществ. В результате этих воздействий инструменты изнашиваются и теряют свои режущие свойства. Таким образом, основными требованиями к материалам, обеспечивающим функциональные свойства медицинского режущего инструмента, обычно считаются: высокая твердость (порядка 60–62 HRC) и износостойкость, режущая способность, коррозионная стойкость, низкий коэффициент трения и устойчивость к малым пластическим деформациям. При этом для медицинских инструментов высокая красностойкость не так важна, как для металлорежущих инструментов.

Для хирургических стоматологических режущих инструментов, таких как боры и сверла, обычно используются специальные марки сталей, включая высокоуглеродистые стали и высокоуглеродистые нержавеющие стали. Общее название таких материалов – «хирургические стали», хотя официального определения того, что именно входит в эту группу материалов, не существует. Как правило, традиционные хирургические стали, используемые в основном для медицинских имплантатов, такие как аустенитная нержавеющая сталь и мартенситные нержавеющие стали, имеют недостаточную твердость (обычно около 52–58 HRC) и плохо держат режущую кромку, поэтому неприемлемы для изготовления медицинского режущего инструмента.

По вышеуказанным причинам наиболее часто используемыми материалами для медицинского

режущего инструмента являются хромоникелевые и хромомолибденовые аустенитные стали и мартенситностареющие стали. Когда содержание хрома превышает 11 %, он образует оксидное покрытие, и сталь становится нержавеющей. Хром, а также молибден, ванадий и вольфрам обеспечивают превосходную остроту и стойкость режущей кромки.

При выборе инструментального материала следует учитывать негативное воздействие ионов никеля, попадающих в организм человека во время хирургических вмешательств. Чтобы избежать аллергии на никель или других негативных последствий, рекомендуется избегать прямого контакта человеческого тела с любыми никельсодержащими материалами. Кроме того, высокое содержание никеля препятствует закалке при термообработке. Поскольку азот стабилизирует аустенитную фазу, его можно использовать вместо никеля в хирургических коррозионностойких сплавах. Поэтому аустенитные нержавеющие стали с высоким содержанием азота, не содержащие никеля, широко используются в медицине [18].

Для режущих инструментов из обычных высокоуглеродистых сталей защита от коррозии может быть обеспечена нанесением гальванического покрытия из хрома или других материалов. В этом случае покрытие, как правило, удаляется с острых режущих кромок. В качестве альтернативы могут использовать износостойкое покрытие из нитрида титана (TiN).

В последние десятилетия стали, полученные по технологии порошковой металлургии, получили широкое распространение в различных отраслях, включая медицину. Передовые порошковые стали, такие как M390 Microclean фирмы Böhler, имеют твердость около 62–64 HRC, высокую износостойкость и коррозионную стойкость, а также превосходную стойкость режущей кромки, обеспечиваемую добавлением хрома, молибдена, ванадия и вольфрама (около 3–4 %). Поверхности инструментов из таких марок стали могут быть отполированы до чрезвычайно высокой чистоты, обеспечивающей отличную режущую способность.

В табл. 1 приведены сравнительные данные наиболее распространенных марок хирургических сталей и их обозначения согласно различным национальным стандартам.

В качестве материалов для режущих частей хирургических и стоматологических инструментов могут использоваться вольфрамсодержащие твердые сплавы и безвольфрамовые твердые сплавы (керметы). На рабочие поверхности таких

Таблица 1

**Химический состав и твердость типичных материалов, используемых для изготовления
медицинского режущего инструмента, с обозначениями в соответствии с различными
национальными стандартами**

Обозначение материала согласно: 1) ГОСТ; 2) AISI; 3) DIN; 4) другим стандартам	C, %	Cr, %	Ni, %	Si, %	Mn, %	Другие легирующие элементы	Твердость после закалки, HRC
1) У8А; 2) С80W1; 3) 1.1525, С80W1	0,75–0,84	<0,2	<0,25	0,17–0,33	–		58–61
1) У10А; 2) W5, W110; 3) 1.1545, С105W1, С105W2; 4) Т10А	0,95–1,09	<0,2	<0,25	0,17–0,33	0,17–0,28		59–62
1) У12А; 4) JIS SK2	1,1–1,29	<0,2	<0,25	0,17–0,33	0,17–0,28		61–64
1) 30X13, 40X13; 2) 420; 3) 1.4028, 1.4034, X30Cr13, X40Cr13; 4) 3Cr13, Cr13, SUS420J2	0,26–0,44	12–14	<0,6	<0,8	<0,8	Mo<4,0 (США)	55–57
2) 420HC	0,4–0,45	12,5–13,5	<0,08	0,25– 0,75	<1,0	Mo: <0,5 Al: <0,5 Cu: <0,5	40–52
1) 98X18; 2) 440; 3) 1.4125, X105CrMo17, X102CrMo17; 4) JIS SUS440C	0,9–1,0	17–19	<0,6	<0,8	<0,8	Ti<0,2 Mo<4,0 (США)	60
2) 154СМ; 4) АТS-34 (Япония)	1,05	14	н/д	0,30%	0,50%	Mo <4,0%	60-64
2) Bohler M390 Microclean	н/д	18-20	н/д	н/д	н/д	Mo, V 3–4%, W	60-62

Составлено авторами на основе анализа научно-технической и справочной литературы

инструментов наносятся износостойкие покрытия из карбидов, нитридов, боридов железа, хрома и других металлов или сплавов, а также сверхтвёрдых материалов типа алмазов. Известны экспериментальные исследования с использованием боров, изготовленных из режущей керамики, но эффективность этих материалов пока не доказана [19].

Алмазные стоматологические боры, по-видимому, обеспечивают лучший контроль и тактильную обратную связь, чем стальные и твердосплавные благодаря тому, что мелкозернистые алмазы всегда находятся в контакте с зубом, в отличие от режущих лезвий традиционных боров. В стоматологической практике все чаще используются алмазные головки, работающие на сверхвысоких скоростях (до 300 000 об/мин).

Далее мы рассмотрим сверла для остеоденсификации с режущими лезвиями из высокоуглеродистых нержавеющей сталей.

**Структурная модель сверла
для остеоденсификации**

Теория графов обеспечивает гибкий и универсальный подход к инженерному анализу. Структурная модель сверла для остеоденсификации, как и любого технического объекта, может быть визуально представлена в виде гиперграфа (рис. 2). В этом графе каждая вершина или ребро обозначает элемент конструкции или его параметр. Такое представление позволяет выделить структурные элементы изучаемого объекта, а расширенная версия графа наглядно показывает систему функциональных связей между конструктивными особенностями объекта, условиями его эксплуатации и показателями производительности и качества. Графовая модель сверл для остеоденсификации основана на комплексном анализе предыдущих исследований, проведенных медиками и инженерами. На основе системы функциональных взаимосвязей можно раз-

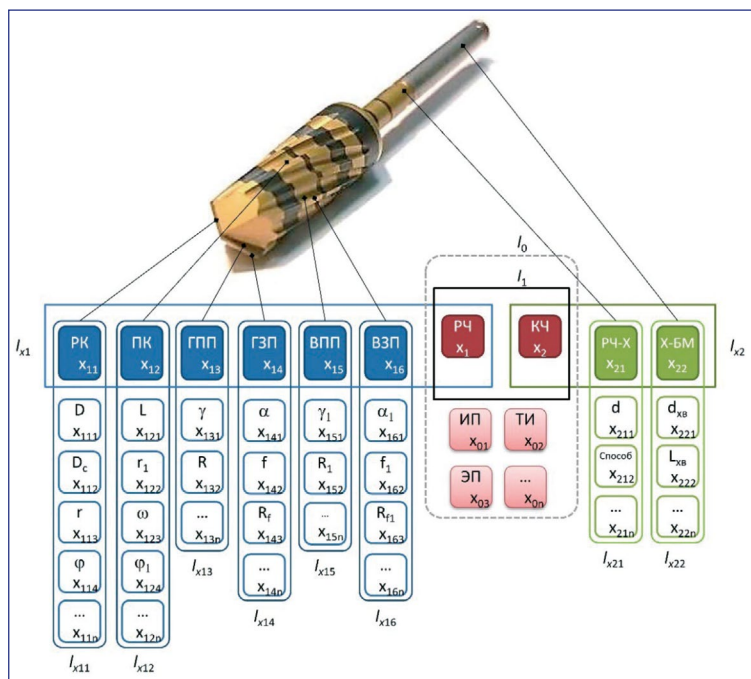


Рис. 2. Гиперграфовая структурная модель сверла для остеоденсификации

Составлено авторами на основе анализа предыдущих исследований

работать исходный набор данных для проектирования инструмента [20].

На рис. 2 ребро l_1 определяет основные конструктивные части сверла, которые включают рабочую часть РЧ (вершина x_1) и крепежную часть КЧ (вершина x_2). Рабочая часть представлена ребром l_{x1} и состоит из режущей кромки РК (вершина x_{11}), периферийной кромки ПК (вершина x_{12}), главной передней поверхности ГПП (вершина x_{13}), главной задней поверхности ГЗП (x_{14}), вспомогательной передней поверхности ВПП (вершина x_{15}) и вспомогательной задней поверхности ВЗП (x_{16}). Каждый из этих элементов имеет параметры, описываемые ребрами l_{x11} – l_{x16} , содержащими соответствующие наборы вершин. Так, режущая кромка РК характеризуется наружным диаметром D (вершина x_{111}), диаметром сердцевин D_c (вершина x_{112}), радиусом округления режущей кромки r (вершина x_{113}), главным углом в плане φ (вершина x_{114}) и другими параметрами (вершина x_{11n}). Периферийная кромка ПК имеет общую рабочую длину L (вершина x_{121}), радиус округления кромки r_1 (вершина x_{122}), угол подъема винтовой канавки ω (вершина x_{123}), вспомогательный угол в плане или угол обратного конуса φ_1 (вершина x_{124}) и другие (вершина x_{12n}). Главная передняя поверхность ГПП имеет следу-

ющие параметры: главный передний угол γ (вершина x_{131}), радиус кривизны передней поверхности R (вершина x_{132}) и другие (вершина x_{13n}). Главная задняя поверхность ГЗП описывается главным задним углом α (вершина x_{141}), шириной фаски f (вершина x_{142}), радиусом кривизны задней поверхности R_{zn} (вершина x_{143}) и другими параметрами (вершина x_{14n}). Вспомогательная передняя поверхность ВПП имеет набор параметров, включающий вспомогательный передний угол γ_1 (вершина x_{151}), радиус кривизны вспомогательной передней поверхности R_1 (вершина x_{152}) и другие (вершина x_{15n}). Вспомогательная задняя поверхность ВЗП включает в себя вспомогательный задний угол α_1 (вершина x_{161}), ширину вспомогательной фаски f_1 (вершина x_{162}), радиус кривизны вспомогательной задней поверхности R_{1l} (вершина x_{163}) и другие (вершина x_{16n}).

Аналогично, крепежная часть сверла (ребро l_{x2}) состоит из конструктивных элементов для соединения рабочей части с хвостовиком РЧ-Х (вершина x_{21}). Этот соединительный элемент характеризуется собственным набором параметров, представленных на графе ребром l_{x21} . Данное ребро включает в себя следующие элементы: диаметр соединения d (вершина x_{211}), параметры способа соединения (вершина x_{212}) и другие (вершина x_{21n}). Связь между сверлом в целом и стоматологическим наконечником (бормашиной) показана в виде ребра l_{x22} , которое состоит из диаметра хвостовика d_{xb} (вершина x_{221}), длины хвостовика L_{xb} (вершина x_{222}) и других (вершина x_{22n}). Кроме того, сверло имеет и другие свойства и параметры (износостойкое покрытие, параметры технологии изготовления, эксплуатационные показатели и другие). Эти характеристики представлены в графе ребром l_0 с вершинами x_{01} – x_{0n} , соответственно.

Иерархия структурных частей сверла для остеоденсификации, его конструктивных элементов и их параметров описывается на гиперграфе функциональными связями между ребрами и вершинами $\{x_1, l_{x1}\}$, $\{x_2, l_{x2}\}$, $\{x_{11}, l_{x11}\}$, $\{x_{12}, l_{x12}\}$, $\{x_{13}, l_{x13}\}$, $\{x_{14}, l_{x14}\}$, $\{x_{15}, l_{x15}\}$, $\{x_{16}, l_{x16}\}$, $\{x_{21}, l_{x21}\}$. Следовательно, общая структура сверла может быть описана следующим образом:

$$l_0 = \bigcup_{i=1}^2 x_i \bigcup_{i=1}^n x_{0i} = \bigcup_{i=1}^6 x_{1i} \bigcup_{i=1}^2 x_{2i} \bigcup_{i=1}^n x_{0i} = \bigcup_{i=1}^n x_{11i} \bigcup_{i=1}^n x_{12i} \bigcup_{i=1}^n x_{13i} \bigcup_{i=1}^n x_{14i} \bigcup_{i=1}^n x_{15i} \bigcup_{i=1}^n x_{16i} \bigcup_{i=1}^n x_{21i} \bigcup_{i=1}^n x_{22i} \bigcup_{i=1}^n x_{0i}. \quad (1)$$

Таким образом формируется набор параметров, используемых для создания базы данных конструкторских и технологических решений, относящихся к рассматриваемому режущему инструменту. Она также должна быть использована в системе автоматизированного проектирования (САПР) для создания параметрической геометрической модели сверла для остеоденсификации.

Конструктивные особенности сверл для остеоденсификации

Как правило, стоматологический бор (сверло) состоит из трех основных частей: головки, шейки и хвостовика. Головка (режущая часть) оснащена острыми режущими лезвиями, которые могут располагаться под различными углами, измеряемыми в радиальном, осевом или нормальном сечении сверла относительно оси симметрии или другой воображаемой прямой линии. Более тупые углы создают отрицательный угол наклона, что снижает режущую способность инструмента. Более острые углы образуют положительный угол, при котором лезвие острее, но быстрее изнашивается и затупляется.

Для операций остеоденсификации сверло должно иметь не менее четырех спиральных режущих кромок, расположенных вдоль спиральных стружечных канавок. При традиционном сверлении костная ткань разрезается режущими кромками, после чего обломки удаляются из отверстия через канавки. Это требует положительного угла наклона режущей кромки для лучшего входа в ткань и оптимального процесса резания при удалении небольшой толщины материала за один оборот сверла. Традиционное сверление выполняется при вращении по часовой стрелке [1]. Эскиз типового сверла для остеоденсификации, разработанного фирмой Versah®, представлен на рис. 3.

В отличие от традиционных сверл, специальные сверла для остеоденсификации должны иметь большой отрицательный передний угол на периферии. В этом случае кромки не режут, а постепенно увеличивают диаметр пилотного отверстия и уплотняют стенки остеотомического участка. Такая конструкция позволяет сохранять кость путем аутотрансплантации костных частиц к стенкам ложа. Типичный диапазон скорости вращения как при сверлении (по

часовой стрелке), так и при денсификации костной ткани (против часовой стрелки) составляет 300–1200 об/мин в зависимости от плотности кости [1].

При проведении хирургических операций крайне важно предотвратить даже кратковременный нагрев до порога 41°C в зоне операции. Обычно сверла для остеоденсификации имеют коническую форму, поскольку, согласно данным [21], конические инструменты с тремя или четырьмя зубьями выделяют меньше тепла, чем цилиндрические с двумя или тремя зубьями. Это объясняется тем, что вся длина конического многозубого сверла взаимодействует с костью, распределяя тепло по большей площади поверхности, что вызывает сравнительно меньшую деформацию, потерю массы и износ сверла.

На основе стандартного алгоритма проектирования традиционных металлорежущих инструментов был определен минимальный набор параметров, необходимых для проектирования сверл для остеоденсификации. Значения этих параметров были получены из литературного и патентного обзора и представлены в табл. 2. Как видно из табл. 2, некоторые параметры либо остаются неопределенными, либо их значения приведены в слишком широком диапазоне. Таким образом, необходимы дальнейшие экспериментальные исследования для установления рациональных значений этих параметров с учетом требуемых показателей качества хирургической операции [22, 23].

На рис. 4 представлена система функциональных связей между тремя основными группами при-

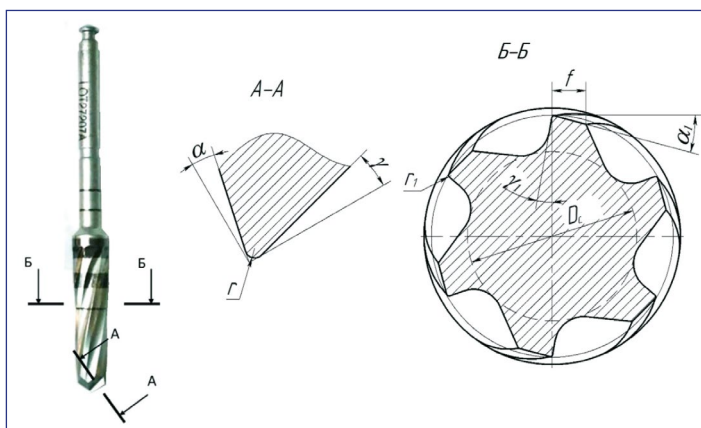


Рис. 3. Эскиз сверла для остеоденсификации Versah®: D_c – диаметр сердцевинки, А-А – сечение, нормальное к режущей кромке; В-В – радиальное сечение; f – ширина ленточки; u – радиус округления главной режущей кромки; r_1 – радиус округления периферийной режущей кромки; γ – главный передний угол; α – главный задний угол; γ_1 – вспомогательный передний угол; α_1 – вспомогательный задний угол

Разработано авторами на основе данных патентных документов и научно-технической литературы

Таблица 2

Основные конструктивные параметры сверл для остеоденсификации

Параметр	Рекомендуемые значения	Комментарий
Материал		
Твердость, HRC	>55	Обеспечивает высокую режущую способность и хорошую стойкость режущей кромки [14]
Предел прочности, МПа	н/д	Предотвращает деформацию и поломку сверла [14]
Теплопроводность	н/д	Рассеивает тепло в корпусе сверла [14]
Износостойкое покрытие	TiN	Уменьшает нагрев, повышает срок службы [14]
Коррозионная стойкость	Cr > 12 %	Предотвращает коррозию [14]
Антиаллергенные свойства	Ni < 0,25 %	Помогает избежать аллергии на никель и других негативных последствий [16]
Режущая часть		
Форма наружного профиля	Цилиндрическая	Предпочтительно для традиционного сверления [10]
	Коническая	При наличии 4 и более зубьев выделяется меньше тепла, чем при использовании цилиндрических сверл [8]
Наружный диаметр	0,4–6 мм	Для конических сверл диаметр постепенно увеличивается по мере углубления в пилотное отверстие [7]
Длина рабочей части	10–25 мм	[10]
Диаметр сердцевины	н/д	Влияет на прочность сверла, глубину канавок и на удаление остатков ткани из области остеотомии
Число периферийных зубьев	4 или больше	Сверла с 4 зубьями обеспечивают лучшее распределение тепла, чем с 2 или 3 зубьями как при конической, так и цилиндрической форме [8]
Угол конуса	Рекомендуется 1...5°, оптимально 2°36' [10]	Влияет на нагрев и уплотнение костной ткани
Передний угол	≥0° для сверления. <0° для остеоденсификации (–1°...–75°, обычно около –30°) [10]	Положительные углы обеспечивают лучшую режущую способность и отсутствие остатков костной стружки в остеотомии. Отрицательные углы способствуют уплотнению стенок в области остеотомии, позволяют сохранить кость за счет аутотрансплантации частиц кости к стенкам ложа [1]
Угол при вершине	30...75° [10]	Влияет на расположение в области остеотомии и начало процесса резания
Главные задние углы	Первый задний угол 3...60°, оптимально 6...28° Второй задний угол около 40° [10]	Определяет способность кости к уплотнению. Влияет на нагрев и прочность зуба
Радиус округления режущей кромки	н/д	Влияет на нагрев и режущую способность
Угол подъема винтовой канавки	5...20° [10]	Влияет на удаление материала из отверстия и способность стенок в области остеотомии к уплотнению
Хвостовик		
Стандартный	Цилиндрический	Стандартный диаметр 1,6 мм (1/16 дюйма) или 2,35 мм (3/32 дюйма)
	Конический	Предпочтительнее для больших диаметров

Составлено авторами на основе данных патентных документов и научно-технической литературы

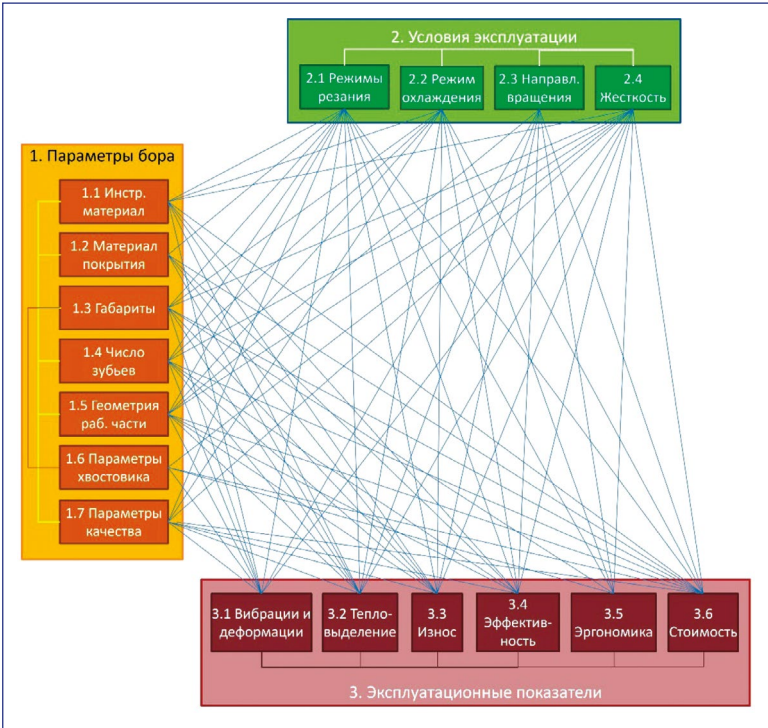


Рис. 4. Гиперграф функциональных связей между основными характеристиками сверл для остеоденсификации, условиями проведения операции и эксплуатационными показателями

знаков и свойств: параметрами сверл для остеоденсификации, условиями их работы и показателями качества операции. Как видно, связи существуют не только между блоками, относящимися к разным группам, но и внутри каждой из них. Таким образом, систему можно представить как гиперграф, подобный описанному выше.

Соответствующие наборы параметров были определены на основе анализа предыдущих исследований, а также инженерного и хирургического опыта авторов. Данная система формирует структуру базы данных, которая в дальнейшем

будет интегрирована в разрабатываемый модуль САПР сверл для остеоденсификации.

Наиболее важные параметры сверл (блоки 1.1–1.7) описаны выше. Дополнительно следует указать, что к параметрам качества сверла (блок 1.7) относятся шероховатость рабочих поверхностей, точность рабочей и зажимной частей, а также параметры технологического процесса изготовления. К режимам резания (блок 2.1) относятся скорость вращения и скорость подачи сверла (обычно контролируется рукой хирурга). Направление вращения (блок 2.3) формально можно рассматривать как режим резания, но было решено выделить его отдельным пунктом, поскольку оно играет ключевую роль в процедуре остеоденсификации. Режим охлаждения (блок 2.2) описывают как необходимость попадания охлаждающей жидкости в ложе дентального имплантата. Жесткость (блок 2.4) характеризует то, как сверло сопротивляется прикладываемым динамическим нагрузкам во время работы. Блоки эксплуатационных показателей (3.1–3.6) в основном не требуют пояснений, за исключением эффективности операции (блок 3.4), которая является сложным критерием хорошей остеоинтеграции, обеспечивающей долгосрочную службу имплантата.

Для создания базы данных САПР этот гиперграф можно представить в виде набора из трех матриц инцидентности (рис. 5). Используются различные цвета для обозначения типа связей (или их весовых коэффициентов). Красный цвет говорит о том, что

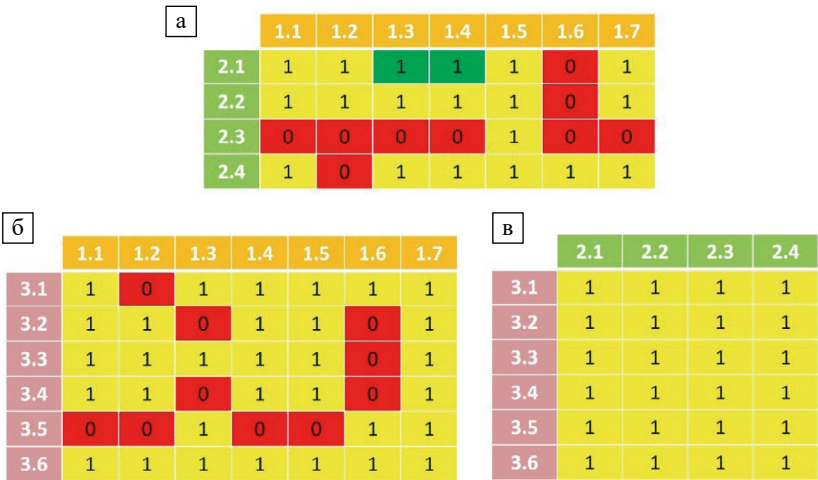


Рис. 5. Матрицы инцидентности, описывающие функциональные связи: а – между конструктивными параметрами сверла и условиями эксплуатации; б – между конструктивными параметрами сверла и эксплуатационными показателями; в – между условиями эксплуатации и эксплуатационными показателями

связи между параметрами нет, или она с трудом поддается описанию. Желтый цвет означает то, что связь установлена эмпирически, но не может быть описана строго аналитически, а лишь, например, уравнением с набором поправочных коэффициентов. Зеленый цвет говорит о возможности представления связи в виде аналитического выражения. Важно подчеркнуть, что типы связей, показанные на рис. 5, были определены для стоматологического применения, но для металлообрабатывающей промышленности многие из тех же или подобных связей могут иметь иное представление.

Выводы

В данной статье проведен анализ режущих инструментов, используемых для процедуры остеоденсификации. Разработана графовая модель конструкции сверла для остеоденсификации, позволяющая выявить важнейшие структурные составляющие и основные требования к их параметрам и свойствам.

Проведен анализ материалов, используемых для изготовления хирургических режущих инструментов. Выявлен ряд сплавов, которые могут быть обоснованно выбраны для изготовления стоматологических режущих инструментов, в том числе сверл для остеоденсификации. Основными требованиями к материалу режущего инструмента являются высокая твердость, коррозионная стойкость и стойкость режущей кромки. Для снижения нежелательного нагрева на рабочую часть сверла может быть нанесено износостойкое покрытие.

Результаты анализа показали, что многие конструктивные параметры сверл для остеоденсификации не определены в литературе или имеют слишком широкий диапазон рекомендуемых значений. Это означает, что необходимо провести дальнейшие исследования для установления оптимальных значений конструктивных параметров сверла.

Таким образом, представленное аналитическое исследование предоставляет формальные модели, являющиеся основой структуры базы данных САПР сверл для остеоденсификации и интерфейса управления ею, которые будут использоваться в дальнейшем для разработки модуля компьютерного проектирования рассматриваемых конструкций стоматологических инструментов. Эти модели также помогут сформировать план эксперимента, используемый в исследованиях, направленных на повышение эффективности процедуры остеоденсификации.

Работа выполнена при поддержке Министерства здравоохранения Российской Федерации в рамках проекта 056-00041-23-00.

Библиографический список

1. Cáceres F., Troncoso C., Silva R., Pinto N. Effects of osseodensification protocol on insertion, removal torques, and resonance frequency analysis of BioHorizons® conical implants. An ex vivo study // *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 2020, 10, pp. 625–628.
2. Stavropoulos, A.; Nyengaard, J.R.; Lang, N.P.; Karring, T. Immediate loading of single SLA implants: Drilling vs. osteo-tomes for the preparation of the implant site // *Clinical Oral Implants Research*, 2008, 19 (1), pp. 55–65.
3. Pandey R.K., Panda S. Drilling of bone: A comprehensive review // *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 2013, 4, pp. 15–30.
4. Punnoose K., Kumar G.A., B M., Govindarajulu R., V.A. A.E. Babu J.S. C.S., Nayyar A.S. Osseodensification implant site preparation technique and subsequent implant stability: A pilot study // *Journal of Orthodontic Science*, 2022, 11, p. 50.
5. Huwais S., Meyer E.G. A Novel Osseous Densification Approach in Implant Osteotomy Preparation to Increase Biomechanical Primary Stability, Bone Mineral Density, and Bone-to-Implant Contact // *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 2017 Jan/Feb, 32(1), pp. 27-36.
6. Bhargava N., Perrotti V., Caponio V.C.A., Matsubara V.H., Patalwala D., Quaranta A. Comparison of heat production and bone architecture changes in the implant site preparation with compressive osteotomes, osseodensification technique, piezoelectric devices, and standard drills: an ex vivo study on porcine ribs // *Odontology*, 2023, 111(1), pp. 142-153.
7. Campos F.E., Gomes J.B., Marin C., Teixeira H.S., Suzuki M., Witek L., Zanetta-Barbosa D., Coelho P.G. Effect of drilling dimension on implant placement torque and early osseointegration stages: an experimental study in dogs // *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2012, 70 (1), pp. 43–50.
8. Mullings O. Tovar N., Abreu de Bortoli J. P., Parra M., Torroni A., Coelho P. G., Witek L. Osseodensification Versus Subtractive Drilling Techniques in Bone Healing and Implant Osseointegration: Ex Vivo Histomorphologic/Histomorphometric Analysis in a Low-Density Bone Ovine Model // *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 2021 Sep-Oct, 36(5), pp. 903–909.
9. Fontes Pereira J., Costa R., Nunes Vasques M., Salazar F., Mendes J.M., Infante da Câmara M. Osseo-

densification: An Alternative to Conventional Osteotomy in Implant Site Preparation: A Systematic Review // *Journal of Clinical Medicine*, 2023, 12, p. 7046.

10. Hung C.C., Liu T.C. Graftless Sinus Augmentation via Crestal Sinus Floor Elevation using Densah Burs with Simultaneous Implant Placement: A Clinical Report after Two Years in Service // *SVOA Dentistry*, 2023, 4:4, pp. 128–136.

11. Elghobashy M.T.M., Shaaban A.M., Melek, L.N.F. Radiographic comparison between Densah burs and osteotome for graftless internal sinus lifting with simultaneous implant placement: a randomized clinical trial // *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2023, 52(3), 388–395.

12. Пат. 2269966 Российская Федерация, МПК А 61 С 3/02. Стоматологический бор / Самойлович М.И., Ивахин А.В., Пастушенко В.Н.; № 2002103552/14; заявл. 14.02.2002, опубл. 10.10.2023, бюл. № 28. – 3 с.: ил.

13. Пат. 2515400 Российская Федерация, МПК А 61 С 3/02. Сверло для имплантационной хирургии / Моон Дзонг Хоон, Еом Тае Гван, Ли Тае Еук; заявитель и патентообладатель ОСТЕМИМПЛАНТ КО., ЛТД. (KR); 2012134550/14 заявл. 13.09.2010, опубл. 20.02.2014, бюл. № 5. – 5 с.: ил.

14. Пат. 2007967 Российская Федерация, МПК А 61 С 3/02. Стоматологический бор / Винокур В.Ш., Игнашин Ю.П., Утяшев Р.А., Шакиров Н.Х., Швецов М.А.; заявитель и патентообладатель Винокур В.Ш.; заявл. 01.10.1991.

15. Пат. 2794293 Российская Федерация, МПК А 61 С 3/02. Стоматологический инструмент / Бурке Э., Соллбергер Д., Нуссбаумер С., Хольст Ш., Гайзельхёрингер Х., Кворри Э., Вайтцель Й.; заявитель и патентообладатель Нобель Биокэр Сервисиз АГ (CH); 2019120420 заявл. 30.01.2017, 14.04.2023 Бюл. № 11. – 1 с.: ил.

16. Patent 9022783 US, A 61 C 3/02, A 61 C 8/00. Fluted osteotome and surgical method for use / Huwais S., assignee Huwais IP Holding LLC, Jackson, MI US; Appl. No 13/427,391, prior publication data US 2012/0244497 A1, Sep. 27, 2012.

17. Сабитов В. Х. Медицинские инструменты. М.: Медицина, 1985. – 175 с.

18. Yang K., Ren Y. Nickel-free austenitic stainless steels for medical applications // *Science and Technology of Advanced Materials*, 2010, 11 (1), p. 014105.

19. Oliveira N., Alaejos-Algarra F., Mareque-Bueno J., Ferrés-Padró E., Hernández-Alfaro F. Thermal changes, and drill wear in bovine bone during implant site preparation. A comparative in vitro study: Twisted stainless steel and ceramic drills // *Clinical Oral Implants Research*, 2013, 23, pp. 963–969.

20. Grechishnikov V.A., Isaev A.V., Kozochkin M.P. A Generalized Approach to Designing Profile Milling Cutters Equipped with Replaceable Throw-Away Ceramic Cutting Inserts. In *Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2020)*, Vladivostok, Russia, 2020; pp. 1–8.

21. Soldatos N., Pham H., Fakhouri W.D., Ngo B., Lampropoulos P., Tran T., Weltman R. Temperature Changes during Implant Osteotomy Preparations in Human Cadaver Tibiae Comparing MIS® Straight Drills with Densah® Burs. *Genes*, 2022, 13, p. 1716.

22. Grigoriev S., Yanushevich O., Krikheli N., Vereschaka A., Milovich F., Andreev N., Seleznev A., Shein A., Kramar O., Kramar S. et al. Investigation of the Nature of the Interaction of Me-MeN-(Me,Mo,Al)N Coatings (Where Me = Zr, Ti, or Cr) with a Contact Medium Based on the Ni-Cr System // *Coatings*, 2022, 12, p. 819.

23. Grigoriev S., Pristinskiy Y., Volosova M., Fedorov S., Okunkova A., Peretyagin P., Smirnov A. Wire Electrical Dis-charge Machining, Mechanical and Tribological Performance of TiN Reinforced Multiscale SiAlON Ceramic Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering // *Applied Sciences*, 2021, 11, p. 657.

References

1. Cáceres, F.; Troncoso, C.; Silva, R.; Pinto, N. Effects of osseodensification protocol on insertion, removal torques, and resonance frequency analysis of BioHorizons® conical implants. An ex vivo study. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, 2020, 10, pp. 625–628.

2. Stavropoulos, A.; Nyengaard, J.R.; Lang, N.P.; Karring, T. Immediate loading of single SLA implants: Drilling vs. osteo-tomes for the preparation of the implant site. *Clinical Oral Implants Research*, 2008, 19 (1), pp. 55–65.

3. Pandey, R.K.; Panda, S. Drilling of bone: A comprehensive review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 2013, 4, pp. 15–30.

4. Punnoose, K.; Kumar, G.A.; B, M.; Govindarajulu, R.; V, A., A, E., Babu J, S., C, S., Nayyar, A.S. Osseodensification implant site preparation technique and subsequent implant stability: A pilot study. *Journal of Orthodontic Science*, 2022, 11, p. 50.

5. Huwais S.; Meyer E.G. A Novel Osseous Densification Approach in Implant Osteotomy Preparation to Increase Biomechanical Primary Stability, Bone Mineral Density, and Bone-to-Implant

Contact. *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 2017 Jan/Feb, 32(1), pp. 27-36.

6. Bhargava, N.; Perrotti, V.; Caponio, V.C.A.; Matsubara, V.H.; Patalwala, D.; Quaranta, A. Comparison of heat production and bone architecture changes in the implant site preparation with compressive osteotomes, osseodensification technique, piezoelectric devices, and standard drills: an ex vivo study on porcine ribs. *Odontology*, 2023, 111(1), pp. 142-153.

7. Campos, F.E.; Gomes, J.B.; Marin, C.; Teixeira, H.S.; Suzuki, M.; Witek, L.; Zanetta-Barbosa, D.; Coelho, P.G. Effect of drilling dimension on implant placement torque and early osseointegration stages: an experimental study in dogs. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2012, 70 (1), pp. 43–50.

8. Mullings, O., Tovar, N.; Abreu de Bortoli, J.P.; Parra, M.; Torroni, A.; Coelho, P. G.; Witek, L. Osseodensification Versus Subtractive Drilling Techniques in Bone Healing and Implant Osseointegration: Ex Vivo Histomorphologic/Histomorphometric Analysis in a Low-Density Bone Ovine Model. *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 2021 Sep-Oct, 36(5), pp. 903–909.

9. Fontes Pereira, J.; Costa, R.; Nunes Vasques, M.; Salazar, F.; Mendes, J.M.; Infante da Câmara, M. Osseodensification: An Alternative to Conventional Osteotomy in Implant Site Preparation: A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*, 2023, 12, p. 7046.

10. Hung, C.C.; Liu, T.C. Graftless Sinus Augmentation via Crestal Sinus Floor Elevation using Densah Burs with Simultaneous Implant Placement: A Clinical Report after Two Years in Service. *SVOA Dentistry*, 2023, 4:4, pp.128-136.

11. Elghobashy, M.T.M.; Shaaban, A.M.; Melek, L.N.F. Radiographic comparison between Densah burs and osteotome for graftless internal sinus lifting with simultaneous implant placement: a randomized clinical trial. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2023, 52(3), 388-395.

12. Patent 2269966 RU, A 61 C 3/02. Dental borer / Samojlovich M. I., Ivakhin A. V., Pastushenko V. N.; Appl. No. № 2002103552/14, 14.02.2002; Date of publication 20.02.2006, Bull. № 5.

13. Patent 2515400 RU, A 61 C 3/02. Implant surgical drill / Moon D. K., Eom T. G., Li T. E.; proprietor OSSTEMIMPLANT KO., LTD. (KR); Appl. No. 2012134550/14, 13.09.2010; Date of publication 10.05.2014, Bull. № 13.

14. Patent 2007967 RU, A 61 C 3/02. Dental drill / Vinokur V. Sh., Ignashin Ju. P., Utjashev R. A., Shakirov

N. Kh., Shvetsov M. A.; proprietor Vinokur Vitalij Shevelevich; Appl. No. 5019506/14, 01.10.1991; Date of publication 28.02.1994.

15. Patent 2794293 RU, A 61 C 3/02. Dental tool / Burke E., Sollberger D., Nussbaumer S., Holst S., Geiselhoeringer H., Quarry A., Weitzel J.; assignee and proprietor NOBEL BIO CARE SERVICES AG (CH); Appl. No. 2019120420, 30.01.2017; Date of publication 14.04.2023 Бюл. № 11.

16. Patent 9022783 US, A 6I C 3/02, A 61 C 8/00. Fluted osteotome and surgical method for use / Huwais, S.; assignee Huwais IP Holding LLC, Jackson, MI US; Appl. No 13/427,391, prior publication data US 2012/0244497 A1, Sep. 27, 2012.

17. Sabitov V. Kh. Meditsinskiye instrumenty [Medical instruments]. Moscow: Meditsina: 1985. 175 p.

18. Yang, K.; Ren, Y. Nickel-free austenitic stainless steels for medical applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2010, 11 (1), p. 014105.

19. Oliveira, N.; Alaejos-Algarra, F.; Mareque-Bueno, J.; Ferrés-Padró, E.; Hernández-Alfaro, F. Thermal changes, and drill wear in bovine bone during implant site preparation. A comparative in vitro study: Twisted stainless steel and ceramic drills. *Clinical Oral Implants Research*, 2013, 23, pp. 963–969.

20. Grechishnikov, V.A.; Isaev, A.V.; Kozochkin, M.P. A Generalized Approach to Designing Profile Milling Cutters Equipped with Replaceable Throw-Away Ceramic Cutting Inserts. In Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2020), Vladivostok, Russia, 2020; pp. 1–8.

21. Soldatos, N.; Pham, H.; Fakhouri, W.D.; Ngo, B.; Lampropoulos, P.; Tran, T.; Weltman, R. Temperature Changes during Implant Osteotomy Preparations in Human Cadaver Tibiae Comparing MIS® Straight Drills with Densah® Burs. *Genes*, 2022, 13, p. 1716.

22. Grigoriev, S.; Yanushevich, O.; Krikheli, N.; Vereschaka, A.; Milovich, F.; Andreev, N.; Seleznev, A.; Shein, A.; Kramar, O.; Kramar, S.; et al. Investigation of the Nature of the Interaction of Me-MeN-(Me, Mo, Al) N Coatings (Where Me = Zr, Ti, or Cr) with a Contact Medium Based on the Ni-Cr System. *Coatings*, 2022, 12, p. 819.

23. Grigoriev, S.; Pristinskiy, Y.; Volosova, M.; Fedorov, S.; Okunkova, A.; Peretyagin, P.; Smirnov, A. Wire Electrical Dis-charge Machining, Mechanical and Tribological Performance of TiN Reinforced Multiscale SiAlON Ceramic Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering. *Applied Sciences*, 2021, 11, p. 657.

Информация об авторах

Исаев Александр Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры инструментальной техники и технологий формообразования, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
a.isaev@stankin.ru

Исаева Мария Леонидовна – кандидат медицинских наук, научный сотрудник научно-клинического отдела онкологии ЛОР-органов, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр оториноларингологии ФМБА России»
kuzukina@mail.ru

Крихели Нателла Ильинична – доктор медицинских наук, профессор, проректор, заведующая кафедрой клинической стоматологии, ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России
krikheli_ni@rosunimed.ru

Цициашвили Александр Михайлович – доктор медицинских наук, доцент, профессор кафедры пропедевтики хирургической стоматологии, ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России
amc777@yandex.ru

Григорьев Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
s.grigoriev@stankin.ru

Перetyagin Павел Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
p.peretyagin@stankin.ru

Information about the authors

Isaev Alexander Vyacheslavovich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Cutting Tools and Forming Technologies”, MSUT “STANKIN”
a.isaev@stankin.ru

Isaeva Maria Leonidovna – cand. Sc. of Medicine, research associate at the department of “ENT Oncology”, The National Medical Research Center for Otorhinolaryngology of the Federal Medico-Biological Agency of Russia
kuzukina@mail.ru

Krikheli Natella Ilyinichna – D.Sc. of Medicine, full professor, vice-rector, head of the department of “Clinical Dentistry”, FSBEI HE «Russian University of Medicine» of MOH of Russia
Akrikheli_ni@rosunimed.ru

Tsitsiashvili Alexander Mikhailovich – D.Sc. of Medicine, docent, professor at the department of “Propaedeutics of Surgical Dentistry”, FSBEI HE «Russian University of Medicine» of MOH of Russia
amc777@yandex.ru

Grigoriev Sergey Nikolaevich – D.Sc. of Engineering, full professor, head of the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”
s.grigoriev@stankin.ru

Peretyagin Pavel Yuryevich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”
p.peretyagin@stankin.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 39–50.

УДК 621.825.001.2

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 39–50.

А.Н. Соболев ✉, **А.Я. Некрасов**, **А.В. Ривкин**

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

✉ Автор для корреспонденции

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МУФТ ХИРТА В T-FLEX CAD

Аннотация

Статья посвящена муфтам Хирта, широко применяемым в различных областях машиностроения, в частности в металлорежущих станках, транспортных машинах, манипуляторах. В статье приведено подробное описание конструкции муфт Хирта, рассмотрен алгоритм аналитического расчета муфт по различным критериям прочности, указаны рекомендуемые материалы отдельных деталей муфт Хирта и рекомендуемые геометрические параметры зубьев муфт, обеспечивающие необходимую точность работы. Отмечен недостаток аналитического расчета, не отражающий распределение нагрузки по высоте зуба муфты. Также приводятся сведения о численном расчете муфт Хирта методом конечных элементов и возникающих при этом проблемах. Отмечена важность учета сил трения, возникающих при сопряжении зубьев муфты. Подробно рассмотрена работа муфты Хирта, применяемой в поворотном столе для позиционной автоматической линии и операции технологического процесса, применяемого при изготовлении муфты Хирта. Приводится информация об автоматизированном проектировании и геометрическом моделировании муфт Хирта в CAD-системе. Научная новизна работы заключается в разработанной авторами методике автоматизированного проектирования муфт Хирта, которая может быть использована для ускорения процесса создания объектов машиностроения, содержащих такие механизмы; разработанная расчетная модель муфты Хирта учитывает влияние исходных параметров применения в оборудовании на конечный геометрический образ муфты, который, в свою очередь, будет отражен в результирующем конструктиве образца технологического оборудования или другом машиностроительном объекте. Практическая значимость работы заключается в том, что в ней предложен комплекс инженерной поддержки автоматизированного проектирования муфт Хирта, включающий варианты проектных решений на основе параметрических адаптивных геометрических 3D-моделей в T-FLEX CAD.

Ключевые слова: муфта Хирта; револьверная головка, расчетная модель, учет трения, изготовление муфты, автоматизированное проектирование; 3D-моделирование

Для цитирования: Соболев А.Н., Некрасов А.Я., Ривкин А.В. Разработка методики автоматизированного расчета и проектирования муфт Хирта в T-FLEX CAD // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 39–50.

A.N. Sobolev ✉, **A.Ya. Nekrasov**, **A.V. Rivkin**

MSUT “STANKIN”

✉ Corresponding author

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR AUTOMATED CALCULATION AND DESIGN OF HIRTH COUPLINGS IN T-FLEX CAD

Abstract

The article is devoted to Hirth couplings, widely used in various fields of mechanical engineering, in particular in metal-cutting machines, transport machines, manipulators. The article provides a detailed description of the Hirth coupling design, considers the algorithm of analytical calculation of couplings by various strength criteria, specifies the recommended materials of individual parts of Hirth couplings and the recommended

geometric parameters of coupling teeth that ensure the required accuracy of operation. The disadvantage of the analytical calculation, which does not reflect the load distribution along the coupling tooth height, is noted. Information on the numerical calculation of Hirth couplings by the finite element method and the problems arising in this case is also provided. The importance of taking into account the friction forces arising when mating the coupling teeth is noted. The operation of the Hirth coupling used in the rotary table for the positional automatic line and the operations of the technological process used in the manufacture of the Hirth coupling are considered in detail. Information on the automated design and geometric modeling of Hirth couplings in a CAD system is provided. The scientific novelty of the work lies in the methodology of automated design of Hirth couplings developed by the authors, which can be used to accelerate the process of creating mechanical engineering objects containing such mechanisms; the developed calculation model of the Hirth coupling takes into account the influence of the initial parameters of application in the equipment on the final geometric image of the coupling, which, in turn, will be reflected in the resulting design of the sample of process equipment or another mechanical engineering object. The practical significance of the work lies in the fact that it proposes a complex of engineering support for the automated design of Hirth couplings, including design solutions based on parametric adaptive geometric 3D models in T-FLEX CAD.

Keywords: Hirth coupling; turret head, calculation model, friction consideration, coupling manufacturing, automated design; 3D modeling

For citation: Sobolev A.N., Nekrasov A.Ya., Rivkin A.V. Development of a methodology for automated calculation and design of Hirth couplings in T-FLEX CAD. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2025. No 1 (72). P. 39–50. (In Russian)

Введение

В современном машиностроении и станкостроении актуальной остается задача использования различных механизмов, обеспечивающих необходимую точность обработки и позиционирования [1-5]. Муфты Хирта применяются для точного позиционирования осесимметричных деталей (рис. 1). Идея таких муфт была предложена немецким инженером Карлом Альбертом Хиртом в 1928 году [6].

Эти муфты имеют следующие преимущества:

- точность с точки зрения взаимного расположения соединяемых между собой частей;
- жесткость системы, благодаря устойчивой самоцентрирующейся геометрии зацепления зубьев;
- большой передаваемый крутящий момент;
- устойчивость к износу, благодаря широкой опорной поверхности зубьев и использованию специальных легированных сталей.

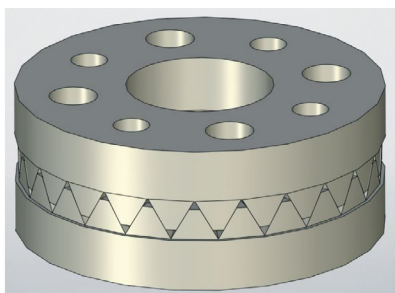


Рис. 1. 3D-модель муфты Хирта

По этим причинам муфты Хирта успешно используются во многих механических системах: в конструкциях поворотных столов, делительных головок, головок автоматической смены инструмента (рис. 2 [7], рис. 3 [8]), резцедержателях (рис. 4 [9]) и других устройствах требующих высокой точности (повторяемости) позиционирования и жесткости, станках, поворотных столах, транспортных устройствах, турбокомпрессорах, робо-

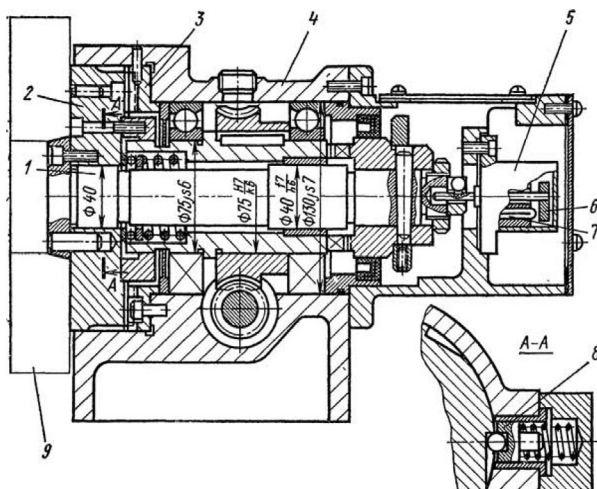


Рис. 2. Ревolverная головка токарно-винторезного станка с ЧПУ 16K20Ф3 [7]:

- 1 – вал; 2 – подвижная часть муфты Хирта;
3 – неподвижная часть муфты Хирта; 4 – корпус головки; 5 – шестипозиционный командоаппарат;
7 – электрические контакты; 8 – фиксатор;
9 – инструментальный диск

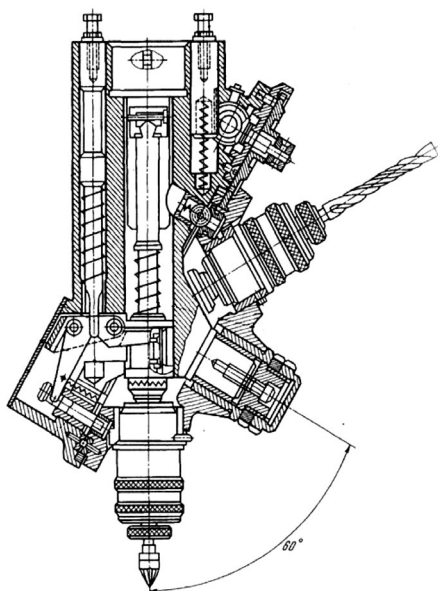


Рис. 3. Револьверная шестишпиндельная головка вертикально-сверлильного станка [8]

тотехнике, судостроении. С недавних пор муфты Хирта применяются в автомобильной промышленности для соединений в ступицах колес.

Важным применением муфт Хирта являются поворотные столы для агрегатных станков и станков с ЧПУ [4, 5]. Эти столы должны полностью фиксироваться в заданных угловых положениях, несмотря на высокие касательные силы. Муфты Хирта в поворотных столах передают большой крутящий момент посредством контакта зубьев, в отличие от фрикционных муфт за счет трения дисков. Кроме того, муфта Хирта должна обеспечивать выполнение строгих требований относительно точного позиционирования поворотного стола с точки зрения его углового положения и особенно его центрирования относительно целевой оси станка после совершения вращения.

Цель работы: на основе анализа работ [1–22] разработать единую расчетную модель и методику автоматизированного проектирования муфт Хирта с использованием отечественной CAD-системы T-FLEX, что ускорит процедуры конструирования объектов машиностроения, включающих такие муфты. Актуальность работы обусловлена тем, что в ней ставятся и успешно решаются задачи ускорения процесса автоматизированного проектирования, разработки методов и моделей проектных решений конструкторско-технологических образов муфт Хирта с целью применения в современном технологическом оборудовании.

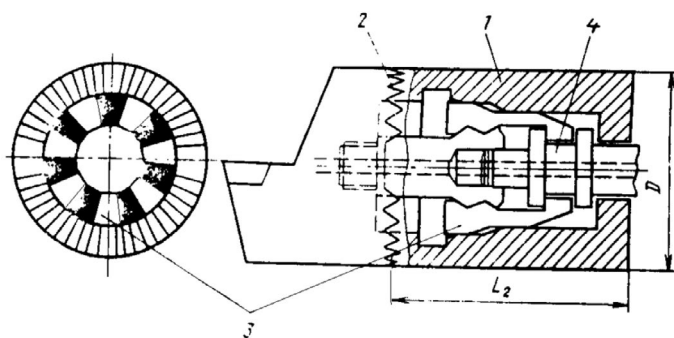


Рис. 4. Крепление головки токарного резца с помощью муфты Хирта [9]:
1 – тело резца (полумуфта Хирта); 2 – головка резца (полумуфта Хирта); 3 – цапга; 4 – винт

Проектирование муфт Хирта

В настоящее время не существует стандартов (ГОСТ, ISO, DIN) для проектирования и производства муфт Хирта. В лучшем случае в каталоге поставщиков можно найти упрощенные формулы расчета.

На основе работ [4, 5, 10-18, 20-22] сформулируем алгоритм расчета муфт Хирта. Согласно рис. 5, общая тангенциальная сила F_u (Н) прикладывается к среднему радиусу R_m (мм) точки G (центра тяжести

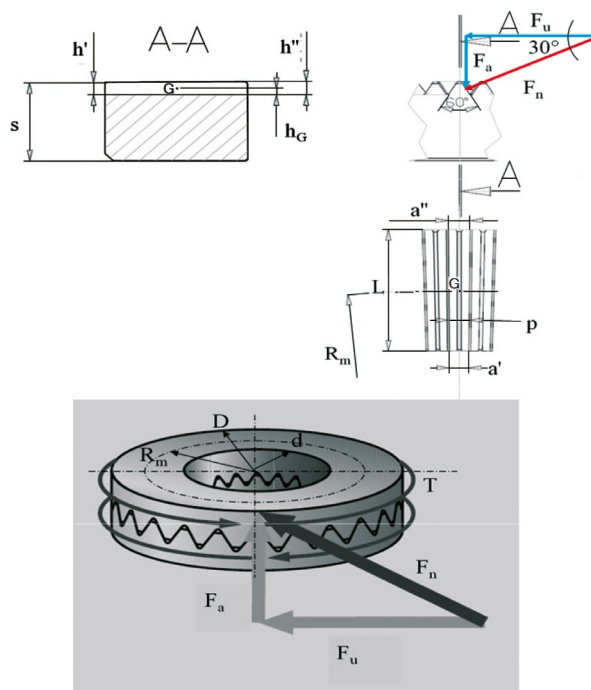


Рис. 5. Геометрия соединения и силы, действующие в муфте Хирта

сти) секции зуба и может быть оценена по уравнению (1) как функция передаваемого крутящего момента T (Н·мм):

$$F_u = \frac{T}{R_m}. \quad (1)$$

Пренебрегая эффектом трения, для угла зуба в 60° (в соединении Хирта этот угол неизменен) осевая сила, создаваемая муфтой, определяется уравнением (2):

$$F_a = F_u \cdot \tan\left(\frac{\pi}{6}\right). \quad (2)$$

Осевое усилие может быть обеспечено, например, с помощью одного или нескольких болтовых соединений, размеры которых должны быть точно определены. Зуб рассчитывается по напряжению изгиба σ_b (МПа), предварительно аппроксимируя трапецевидное сечение у основания прямоугольным, как указано в уравнении (3), где z – количество зубьев:

$$\sigma_b = \frac{6 \cdot \frac{F_u}{z} \cdot h_G}{L \cdot \left(\frac{a' + a''}{2}\right)^2} \leq \sigma_{b_ref}. \quad (3)$$

Справочные референсные значения напряжения изгиба σ_{b_ref} (МПа) приведены в табл. 1 [5].

В [12] дается дополнительное уравнение (4), позволяющее связать крутящий момент T (Н·мм) с напряжением сдвига τ (МПа) для сравнения с допустимыми значениями τ_{b_ref} (МПа) в табл. 1.

$$\tau = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right]} \leq \tau_{ref}. \quad (4)$$

Максимальное (пиковое) напряжение изгиба у основания зуба зависит от распределения напряжений вдоль зуба и радиуса r (мм) у основания. Значения, указанные в [4, 5, 11], могут дать только номинальные значения без учета местной концентрации напряжений. В любом случае эти упрощенные формулы (1–4) имеют то преимущество, что они полностью подтверждены экспериментально. В последние годы развитие и усовершенствование метода конечных элементов позволило добиться более точной оценки фактического пикового напряжения в соответствии с положениями (или методами), представленными в работах [12, 13, 20–22]. Эти методы могут подойти и для расчета фронтальной (корончатой) сцепки зубьев [14–16]. Ограничение в этой области связано с отсутствием экспериментальных исследований на реальных изделиях, с целью связи максимального напряжения с фактической реакцией в соединении Хирта. На это, вероятно, влияет несколько факторов:

- сила, действующая на каждый зуб;
- площадь контакта;
- отверстия для монтажа;
- трение между зубьями;
- процесс термообработки (зубья закаленные, не всегда с одинаковой твердостью), градиент твердости на зубьях;
- механические остаточные напряжения, возникающие в результате шлифовальных операций.

Метод расчета муфт Хирта основан на предположении, что внешний крутящий момент T (Н·мм) создает касательную силу F_u (Н) (уравнение (1)). F_u , в свою очередь, определяет осевую силу F_a (Н) (уравнение (2)). Это осевое усилие F_a должно восприниматься устройствами предварительного натяжения, такими как дисковые пружины, гидравлические поршни или винтовые соединения. Требуемую предварительную нагрузку F_{v-a} (Н) рассчитывают, вводя коэффициент запаса ν (уравнение (5)):

$$F_{v-a} = \nu \cdot F_a = (1.8...3) \cdot F_a. \quad (5)$$

Таблица 1

Допустимые напряжения для углеродистых и легированных сталей при радиусе основания $r > 0,3$ мм.

Тип воздействия	Углеродистая сталь		Легированная сталь	
	σ_{b_ref} (МПа)	τ_{b_ref} (МПа)	σ_{b_ref} (МПа)	τ_{b_ref} (МПа)
Без ударов	90	33.5	120	44.5
С ударами	50	18.5	70	26
С ударами и крутильными колебаниями	35	13	50	18.5

При сжатии зубья «поддерживают» (компенсируют) друг друга, если предварительная нагрузка F_{V-a} (Н) достаточно высока. Различные нагрузки на боковые поверхности зуба приводят лишь к слегка неравномерному распределению предварительной нагрузки давления в поперечном сечении основания зуба, создавая максимальное давление P_{\max} (МПа) в соответствии с уравнением (6). В этом уравнении 6 (см. рис. 6) A_z (мм²) – эффективная площадь боковой поверхности зуба, D и d (мм) – внешний и внутренний диаметры зубьев, d_L (мм) – диаметр крепежного отверстия, n_b – количество болтов на

поверхности диска, r (мм) – радиус основания зуба, s (мм) – зазор между поверхностью вершин зубьев одного диска и поверхностью впадин зубьев сопрягаемого диска, z – количество зубьев и η_z – коэффициент несущей способности (0,65 для фрезерованных зубьев или 0,75 для шлифованных зубьев). При сжатии, при достаточно высокой нагрузке F_{V-a} и отсутствии передачи крутящего момента, эта нагрузка равномерно распределяется по обеим граням каждого зуба. И наоборот, при передаче крутящего момента T давление повышается на одной грани зуба и падает на другой.

$$P_{\max} = \frac{F_{V-a} + F_a}{A_z},$$

$$A_z = \left(D - d - \frac{n_b \cdot d_L^2}{D + d} \right) \cdot \left[\frac{\pi}{4} (D + d) - 1.155 \cdot z \cdot (r + s) \right] \cdot \eta_z. \quad (6)$$

Что касается геометрии, производители предлагают фиксированные табличные параметры для расчета высоты зуба h (мм) в соответствии со средним радиусом R_m (мм) (см. рис. 6, уравнение (7) и табл. 2) [5].

$$h = c \cdot D - (2 \cdot r + s). \quad (7)$$

Эффект трения между сопрягаемыми зубьями при стандартном расчете муфт Хирта не учитывается. Однако этот эффект важно учитывать, поскольку он негативно влияет на безопасность: согласно уравнению (8) при наличии трения (угол трения ρ (°)), при одинаковой осевой силе, фактическая передаваемая нагрузка $F_{u,\mu}$ (Н) снижается, при том, что предварительный натяг остается неизменным. В противном случае для достижения той же

передаваемой нагрузки потребуется более высокий осевой предварительный натяг. Коэффициент трения $\mu = \tan(\rho)$ в зажимных муфтах можно оценить с помощью экспериментальных испытаний, например, описанных в [17, 18], и его величина может находиться в диапазоне от 0,1 до 0,3 для гладких поверхностей.

$$\begin{cases} F_{u,\mu} = \frac{F_a}{\tan\left(\frac{\pi}{6} + \rho\right)}, \\ F_{u,\mu} = F_u \cdot K. \end{cases} \quad (8)$$

На рис. 7 коэффициент уменьшения передаваемой нагрузки (K , уравнение (8)) представлен как функция угла трения.

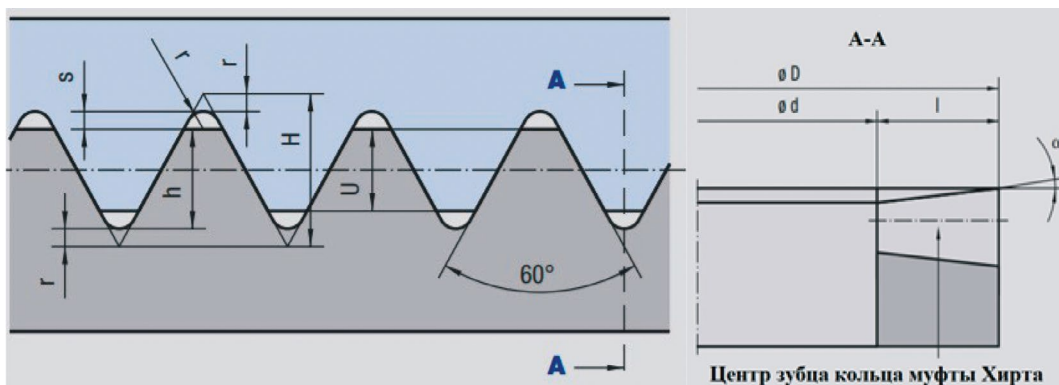


Рис. 6. Геометрические параметры от производителя «Voith-Turbo GmbH» [5]

Таблица 2

Коэффициенты производителя
«Voith-Turbo GmbH» для выбора
коэффициента c и зазора s [5]

Количество зубьев z	Коэффициент c
12	0,234
24	0,114
36	0,075
48	0,056
60	0,045
72	0,037
96	0,028
120	0,022
144	0,018
180	0,015
240	0,011
288	0,009
360	0,007
720	0,003
Радиус в основании зуба r	Зазор s
0,3	0,4
0,6	0,6
1,0	1,0
1,6	1,6
2,5	2,5

На давление (напряжение) между зубьями также влияет коэффициент трения, но с меньшим эффектом. С помощью нелинейного анализа методом конечных элементов (нелинейного из-за скользящих элементов в контакте) можно рассчитать процентный коэффициент уменьшения давления зуба (K_p) по отношению к значению, рассчитанному по уравнению (6)) и затем его отобразить на диаграмме (рис. 8). В случае незначительного трения ($\mu \rightarrow 0$) разница между результатом по уравнению (6) и численным исследованием практически равна нулю.

Как было сказано ранее, соединения Хирта обладают способностью самоцентрироваться. Эта функция особенно важна в тех случаях, когда в процессе эксплуатации кольца должны быть расцеплены, а потом введены в зацепление. Наиболее распро-

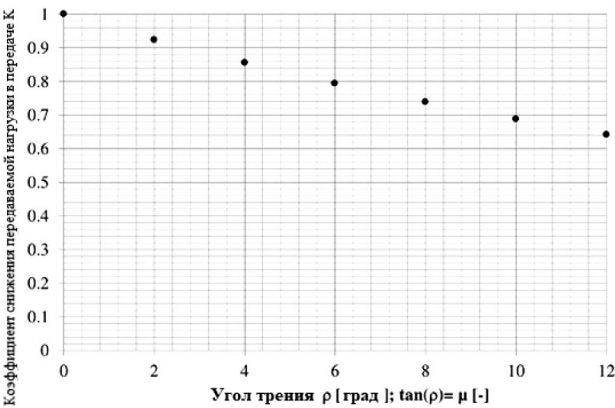


Рис. 7. Коэффициент K снижения передаваемой нагрузки в передаче в зависимости от угла трения ρ

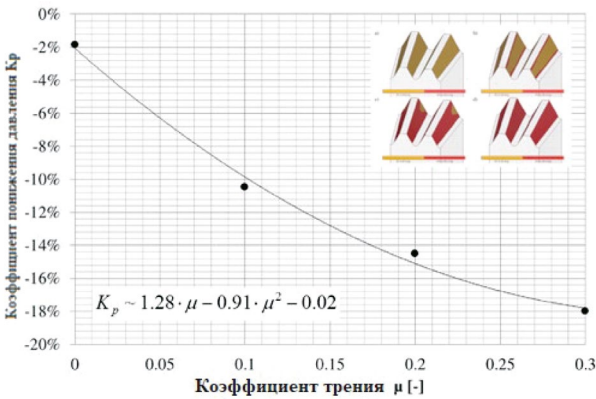


Рис. 8. Коэффициент понижения давления на зубья K_p в зависимости от коэффициента трения μ

страненный пример – поворотные столы станков и автоматических линий. В многопозиционной автоматической линии происходит последовательность двух действий:

- при выполнении операций обработки стол фиксируется с включенными (сомкнутыми) кольцами Хирта (жесткое соединение обеспечивает соблюдение строгих геометрических допусков для обрабатываемой детали);
- после решения задач обработки на одной позиции (рабочем месте) стол должен повернуться на следующую позицию (рабочее место): для этого соединение колец должно быть расцеплено. После поворота стола к следующей позиции его необходимо снова зафиксировать, чтобы начать новую операцию обработки.

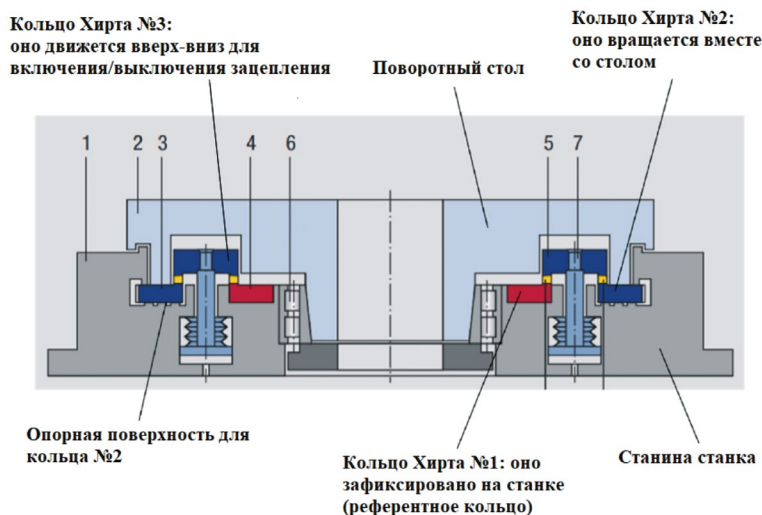


Рис. 9. Пример поворотного стола для позиционной автоматической линии:

1 – станина; 2 – поворотный стол;
3 – кольцо Хирта № 2;
4 – кольцо Хирта № 1;
5 – кольцо Хирта № 3;
6 – подшипник; 7 – устройство создания осевого центрирования)

Повторяемость, точность и способность к самоцентрированию необходимы для производства деталей, соответствующих очень строгим геометрическим допускам. Рис. 9 описывает вышеупомянутый цикл применительно к тройному соединению Хирта:

- кольцо № 1 закреплено на станке и является ориентиром (референтом) для точного положения (оно не перемещается);
- кольцо № 2 соединено с поворотным столом, оно движется (вращается) вместе со столом (стол должен всегда возвращаться в одно и то же положение относительно станка);
- кольцо № 3 отвечает за включение/выключение и точное положение.

Когда кольцо № 3 перемещается вверх, стол расцепляется и может вращаться от позиции к позиции с помощью механического привода (электродвигатель + редуктор). Как только стол приближается к необходимому положению, двигатель останавливается в зоне предварительного позиционирования поскольку допуски для зубчатых колес коробки

передач (редуктора) не позволяет точно обеспечить позиционирование), после этого кольцо № 3 может двигаться вниз. При движении сверху вниз, поскольку зубья имеют коническую форму от наружного диаметра к внутреннему (рис. 5), кольцо № 3 изначально сопряжено с референтным кольцом № 1 (кольцо № 3 совмещено с кольцом № 1). После этого кольцо № 3 подходит к подвижному кольцу № 2, которое занимает правильное положение (кольцо № 2 также совмещено с кольцом № 1). Для правильного позиционирования кольца № 2 осевая сила F_a (Н) должна быть достаточно высокой, чтобы переместить весь вес, относящийся к поворотному столу, на опорную поверхность.

Перед фазой зацепления необходимо рассмотреть три возможных сценария (см. рис. 10):

- неподвижное и вращающиеся кольца имеют один и тот же центр и имеют разное угловое положение;
- неподвижное и вращающиеся кольца имеют разные центры и одинаковое угловое положение;
- сочетание 1 и 2 случаев.

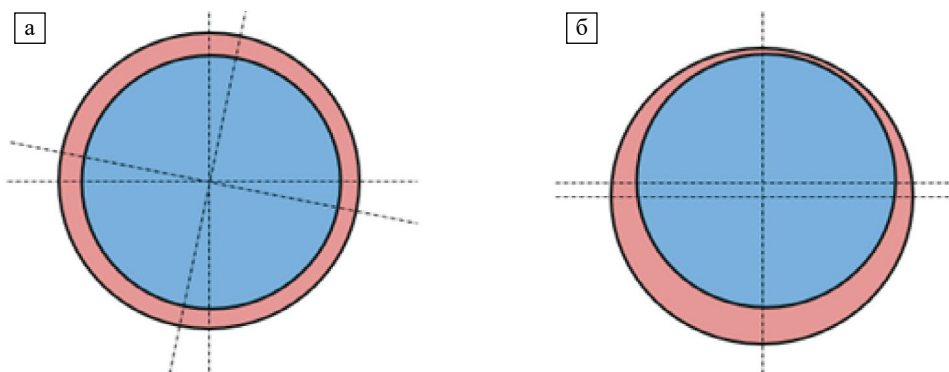


Рис. 10. Положение кольца № 2 перед фазой включения:
а) необходимо отрегулировать угол; б) необходимо отрегулировать центр

Сила самоцентрирования F_c (Н) должна быть достаточна, чтобы преодолеть все силы трения и, следовательно, переместить вращающееся кольцо (вместе с полезной массой) в правильное положение. Силу самоцентрирования F_c (Н) можно рассчитать с помощью уравнения (9), где каждый отдельный зуб вносит свой вклад в зависимости от его углового положения:

$$F_c = 4 \cdot \sum_{i=0}^{z/4} \frac{F_a}{z \cdot \tan\left(\frac{\pi}{6} + \rho\right)} \cdot \sin\left(i \cdot \frac{360^\circ}{z}\right) = K_C \cdot \frac{F_a}{\tan\left(\frac{\pi}{6} + \rho\right)}, \quad (9)$$

$K_C = 0.642$ для $z = 360$; $K_C = 0.650$ для $z = 144$; $K_C = 0.664$ для $z = 72$.

Что касается изготовления колец муфт Хирта, наиболее широко используемыми материалами являются легированные стали 38ХМ, 40ХФА, 35Х.

Технологический процесс производства колец муфт Хирта основан на следующих операциях:

- токарная обработка;
- сверление крепежных отверстий;
- фрезерование зубьев;
- индукционная закалка зоны зубьев (закалка в диапазоне 52...60 HRC);
- черновая шлифовка зубьев;
- чистовая шлифовка зубьев и опорных поверхностей;
- контроль размеров;
- обработка отверстий под штифты;
- окончательный контроль и составление протокола измерений.

Высокую стоимость колец муфты Хирта определяют угловая точность $\pm 2''$ (сек.), повторяемость измерений погрешности $< 0,001$ мм, способность к самоцентрированию, высокая износостойкость и длительный срок службы.

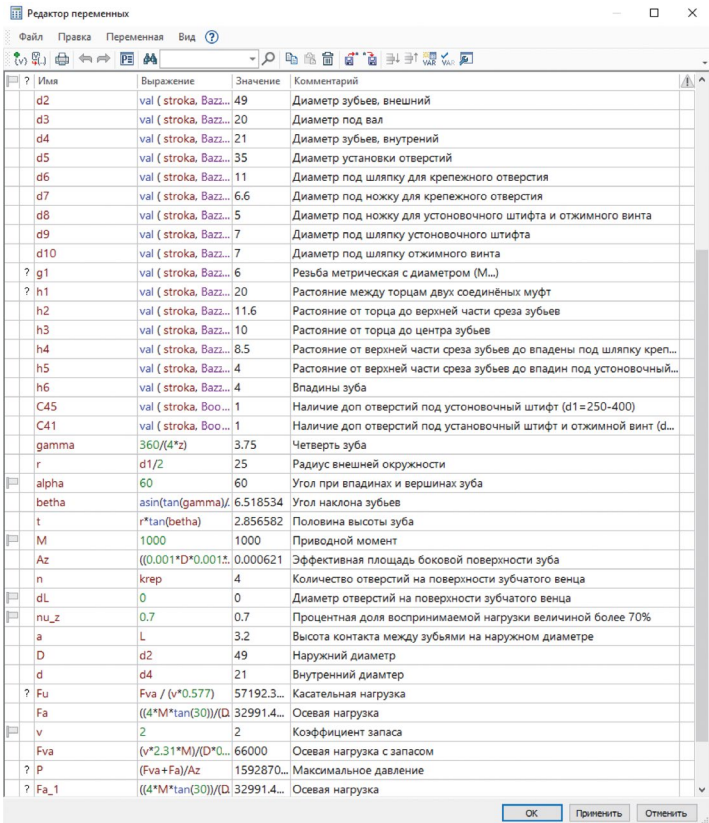
Автоматизация проектирования муфт Хирта

Определив алгоритм геометрического синтеза элементов муфт Хирта, авторами разработана параметрическая модель колец Хирта в T-FLEX CAD на основе параметров, размещенных в конструкторской БД на основе СУБД Access. Параметризация построений и расчетов выполнена с помощью редактора переменных T-FLEX CAD (рис. 11) и формул, указанных выше. Расчет масс-инерционных характеристик может быть легко выполнен с помощью CAD-системы. Кроме того, возможен автоматическое проведение измерений, например,

определение эффективной площади боковой поверхности зуба A_z – для определения давления на зубья p_{\max} по формуле (6) – это осуществляется с помощью инструмента «Измерение» T-FLEX CAD.

На рис. 12 представлены различные исполнения колец муфты Хирта, сгенерированные автоматически в CAD-системе. Отметим, что используется всего лишь одна параметрическая модель T-FLEX CAD. На рис. 13 представлена сборка колец муфты Хирта.

На основе силовой модели, описанной выше, для муфты Хирта может быть проведен автоматизированный расчет методом конечных элементов



Имя	Выражение	Значение	Комментарий
d2	val (stroka, Bazz...	49	Диаметр зубьев, внешний
d3	val (stroka, Bazz...	20	Диаметр под вал
d4	val (stroka, Bazz...	21	Диаметр зубьев, внутренний
d5	val (stroka, Bazz...	35	Диаметр установки отверстий
d6	val (stroka, Bazz...	11	Диаметр под шляпку для крепежного отверстия
d7	val (stroka, Bazz...	6.6	Диаметр под ножку для крепежного отверстия
d8	val (stroka, Bazz...	5	Диаметр под ножку для установочного штифта и отжимного винта
d9	val (stroka, Bazz...	7	Диаметр под шляпку установочного штифта
d10	val (stroka, Bazz...	7	Диаметр под шляпку отжимного винта
g1	val (stroka, Bazz...	6	Резьба метрическая с диаметром (М...)
h1	val (stroka, Bazz...	20	Расстояние между торцами двух соединённых муфт
h2	val (stroka, Bazz...	11.6	Расстояние от торца до верхней части среза зубьев
h3	val (stroka, Bazz...	10	Расстояние от торца до центра зубьев
h4	val (stroka, Bazz...	8.5	Расстояние от верхней части среза зубьев до впадины под шляпку креп...
h5	val (stroka, Bazz...	4	Расстояние от верхней части среза зубьев до впадин под установочный...
h6	val (stroka, Bazz...	4	Впадины зуба
C45	val (stroka, Boo...	1	Наличие дуп отверстий под установочный штифт (d1=250-400)
C41	val (stroka, Boo...	1	Наличие дуп отверстий под установочный штифт и отжимной винт (d...
gamma	360/(4*z)	3.75	Четверть зуба
r	d1/2	25	Радиус внешней окружности
alpha	60	60	Угол при впадинах и вершинах зуба
betha	asin(tan(gamma)/...	6.518534	Угол наклона зубьев
t	r*tan(betha)	2.856582	Половина высоты зуба
M	1000	1000	Приводной момент
Az	((0.001*D*0.001*...	0.000621	Эффективная площадь боковой поверхности зуба
n	krep	4	Количество отверстий на поверхности зубчатого венца
dL	0	0	Диаметр отверстий на поверхности зубчатого венца
nu_z	0.7	0.7	Процентная доля воспринимаемой нагрузки величиной более 70%
a	L	3.2	Высота контакта между зубьями на наружном диаметре
D	d2	49	Наружный диаметр
d	d4	21	Внутренний диаметр
Fu	Fva / (v*0.577)	57192.3...	Касательная нагрузка
Fa	((4*M*tan(30))/D)	32991.4...	Осевая нагрузка
v	2	2	Коэффициент запаса
Fva	(v*2.31*M)/(D*0...	66000	Осевая нагрузка с запасом
P	(Fva+Fa)/Az	1592870...	Максимальное давление
Fa_1	((4*M*tan(30))/D)	32991.4...	Осевая нагрузка

Рис. 11. Окно редактора переменных T-FLEX CAD с параметрами для синтеза 3D-моделей элементов муфт Хирта

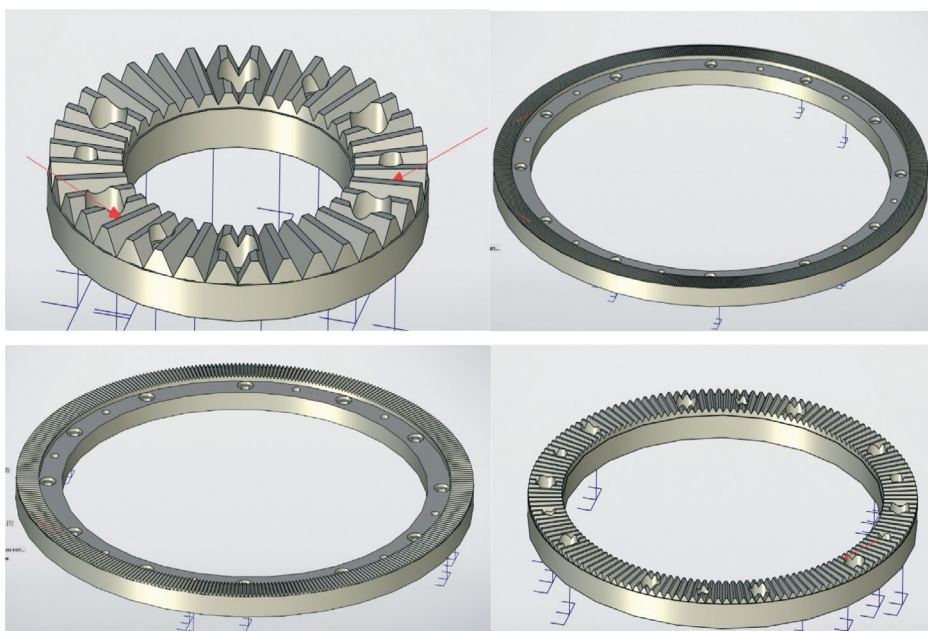


Рис. 12. Параметрическая 3D-модель кольца муфты Хирта

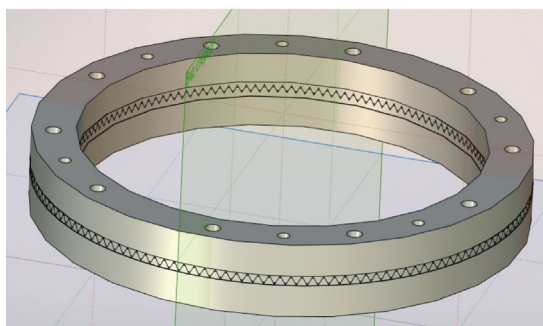
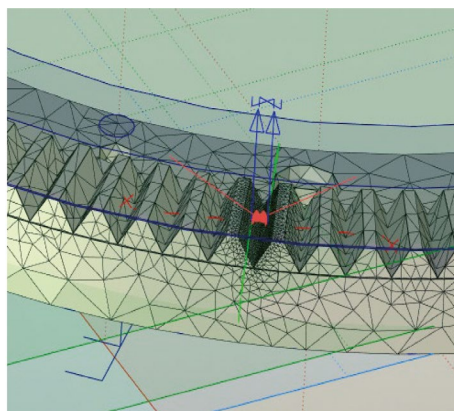


Рис. 13. Сборная 3D-модель муфты Хирта



на прочность и долговечность. Расчет выполняется с использованием САЕ-модуля «Анализ» пакета T-FLEX. Положение узлов для приложения сил формируется на основе параметрической модели. Примеры разбиения на конечные элементы и пробный расчет парных зубьев кольца муфты Хирта представлен на рис. 14.

Заключение

В представленной работе на основе международного [1-18, 20-22] и собственного опыта расчетов похожих передач [19] систематизирован алгоритм расчета муфт Хирта. К сожалению, в отечественной литературе этим ответственным и перспективным муфтам уделено недостаточно внимания.

Авторами разработан алгоритм геометрического синтеза элементов муфт Хирта, с использова-

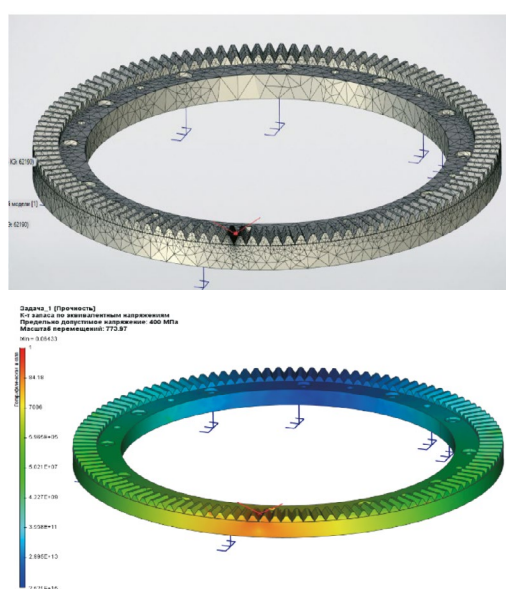


Рис. 14. САЕ-расчет зубьев колец муфты Хирта в T-FLEX CAD

нием которого разработана адаптивная 3D-модель колец Хирта в T-FLEX CAD на основе параметров, размещенных в конструкторской базе данных. Параметризация построений и расчетов выполнена с помощью редактора переменных T-FLEX CAD. С помощью CAD-системы может быть проведен расчет масс-инерционных характеристик. В работе представлены различные исполнения колец муфты Хирта, сгенерированных автоматически в CAD-системе, приводится сборка колец муфты Хирта.

Проведен автоматизированный расчет муфт на прочность и долговечность методом конечных элементов с использованием CAE-модуля «Анализ» пакета T-FLEX с примером разбиения на конечные элементы и пробным расчетом парных зубьев муфты Хирта.

Авторами разработана библиотека параметров муфт Хирта для T-FLEX CAD, с возможностью автоматической генерации 3D-моделей и результатов расчетов. База данных библиотеки является расширяемой и допускает добавление новых числовых конфигураций муфт Хирта с модификацией на основе вновь приобретаемого эмпирического опыта методики геометрических и силовых расчетов без необходимости написания программ на языках высокого уровня. Для создания спектра моделей муфт Хирта используется одна параметрическая адаптивная 3D-модель T-FLEX CAD.

Опыт проектирования муфт Хирта апробирован в учебном процессе на кафедре станков в 2024 году.

Библиографический список

1. Исаев А.В., Лядник С.В., Купцов В.Р. Анализ конструкций приводных инструментальных блоков для прецизионных токарных станков с ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин». – 2022. – № 4 (63). – С.75–80.
2. Гречишников В.А., Пивкин П.М., Исаев А.В., Ершов А.А., Исаев А.В., Яшков В.А., Белоцкий А.С., Минин И.В., Бушуев В.В., Надыкто А.Б. Расширение технологических возможностей шлифовально-заточных станков с ЧПУ при изготовлении и заточке режущего инструмента методами API САПР // СТИН. – 2022. – № S12–2. – С.2–5.
3. Петухов Ю.Е., Домнин П.В., Желтиков С.А. Математическое моделирование профиля часового зубчатого колеса с помощью средств математического программирования в среде MathCAD // Вестник МГТУ «Станкин». – 2022. № 4 (63). – С.85–90.
4. Croccolo D.; Cavalli O.; De Agostinis M.; Fini S.; Olmi G.; Robusto F.; Vincenzi N. A. Methodology for the Lightweight Design of Modern Transfer Machine Tools // Machines, – 2018, 6, 2.
5. Croccolo D., De Agostinis M., Fini S., G., Robusto F., Vincenzi N. On Hirth Ring Couplings: Design Principles Including the Effect of Friction // Actuators 2018, 7, 79.
6. Hirth C.A. Shaft Coupling. U.S. Patent 1,660,792, 28 February 1928.
7. Станок 16K20Ф3 // Технологии обработки металлов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.metalcutting.ru/content/stanok-16k20fz> (дата обращения: 20.08.2024).
8. Бушуев В.В. Станочное оборудование автоматизированного производства / под ред. В.В. Бушуева. – М.: Станкин, 1993. – Т. 2. – 650 с.
9. Вспомогательный инструмент для токарных станков с ЧПУ // Вунивере.ру. Учебные материалы для студентов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vunivere.ru/work13108/page2> (дата обращения: 20.08.2024).
10. Matzke G. Verbindung von Wellen durch Verzahnung // Konstruktion. – 1951, 3, 211–216.
11. Niemann G., Winter H., Hohn B.R. Maschinenelemente; Springer-Verlag: Berlin, Germany, 2005.
12. Croccolo D., De Agostinis M., Vincenzi N. Normalization of the stress concentrations at the rounded edges of a shaft-hub interference fit: Extension to the case of a hollow shaft // J. Strain Anal. Eng. 2012, 47, 131–139.
13. Croccolo D., De Agostinis M., Fini S., Morri A., Olmi G. Analysis of the influence of fretting on the fatigue life of interference fitted joints. In Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress
14. Jiang X.J., Zhang Y.Y., Yuan S.X. Analysis of the contact stresses in curvic couplings of gas turbine in a blade-off event // Strength Mater. – 2012. – 44, 539–550.
15. Yuan S.X., Zhang Y.Y., Zhang Y.C., Jiang X.J. Stress distribution and contact status analysis of a bolted rotor with curvic couplings. Proc. I. Mech. Eng. C–J. Mec. 2010, 224, 1815–1829.
16. Richardson I.J., Hyde T.M., Becker A.A., Taylor J.W. A three-dimensional finite element investigation of the bolt stresses in an aero-engine curvic coupling under a blade release condition // Proc. Inst. Mech. Eng. G–J. Aerosp. Eng. 2000, 214, 231–245.
17. Croccolo D., Cuppini R., Vincenzi N. Friction coefficient definition in compression-fit couplings applying the DOE method. Strain 2008, 44, 170–179.
18. RR71, Friction in Temporary Works, ISBN 0 7176 2613 X, HSE Books. URL: <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr071.htm> (дата обращения: 10.06.2024).

19. Пирожков В.Г., Соболев А.Н., Некрасов А.Я., Арбузов М.О. Автоматизированное проектирование и моделирование в машиностроении: ортогональные цилиндрико-конические передачи // Труды РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2019. – № 2. – С. 95–106.

20. Abruzzo M., Macoretta G., Romoli L., Veracini M. Technological and contact analysis of Hirth joints including manufacturing tolerances. *Precision Engineering*, 2024, 86, 66–74.

21. Kim B.J., Oh J., Palazzolo A. Test and Theory for a Refined Structural Model of a Hirth Coupling. *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power*, 2022, 144, 031027.

22. Kim B.J., Oh J., Palazzolo A. Beam based rotordynamics modelling for preloaded Hirth, Curvic and butt couplings. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 565, 117921.

References

1. Isaev A.V., Lyadnik S.V., Kuptsov V.R. Analysis of designs of drive tool blocks for precision CNC lathes. *Bulletin of MSUT "Stankin"*. 2022. No. 4 (63). P.75–80.

2. Grechishnikov V.A., Pivkin P.M., Isaev A.V., Ershov A.A., Isaev A.V., Yashkov V.A., Belotsky A.S., Minin I.V., Bushuev V.V., Nadykto A.B. Expanding the technological capabilities of CNC grinding and sharpening machines in the manufacture and sharpening of cutting tools using API CAD methods. *STIN*. 2022. No. S12–2. P.2–5.

3. Petukhov Yu.E., Domnin P.V., Zheltikov S.A. Mathematical modeling of the profile of a clock gear using mathematical programming tools in the MathCAD environment. *Bulletin of MSUT "Stankin"*. 2022. No. 4 (63). P.85–90.

4. Croccolo, D.; Cavalli, O.; De Agostinis, M.; Fini, S.; Olmi, G.; Robusto, F.; Vincenzi, N. A. Methodology for the Lightweight Design of Modern Transfer Machine Tools. *Machines* 2018, 6, 2.

5. Croccolo, D.; De Agostinis, M.; Fini, S.; Olmi, G.; Robusto, F.; Vincenzi, N. On Hirth Ring Couplings: Design Principles Including the Effect of Friction. *Actuators* 2018, 7, 79.

6. Hirth, C.A. Shaft Coupling. U.S. Patent 1,660,792, 28 February 1928.

7. Machine 16K20F3. Metal processing technologies [Electronic resource]. Access mode: <https://www.metalcutting.ru/content/stanok-16k20fz> (date of access: 08/20/2024).

8. Bushuev V.V. Equipment for technical production / edited by V.V. Bushuev. Moscow: Stankin, 1993. Vol. 2. 650 p.

9. Reference tool for CNC lathes // Vunivere.ru. Educational materials for students [Electronic resource]. Access mode: <https://vunivere.ru/work13108/page2> (date of access: 08/20/2024).

10. Matzke, G. Verbindung von Wellen durch Verzahnung. *Konstruktion* 1951, 3, 211–216.

11. Niemann, G.; Winter, H.; Hohn, B.R. Maschinenelemente; Springer-Verlag: Berlin, Germany, 2005.

12. Croccolo, D.; De Agostinis, M.; Vincenzi, N. Normalization of the stress concentrations at the rounded edges of a shaft-hub interference fit: Extension to the case of a hollow shaft. *J. Strain Anal. Eng.* 2012, 47, 131–139.

13. Croccolo, D.; De Agostinis, M.; Fini, S.; Morri, A.; Olmi, G. Analysis of the influence of fretting on the fatigue life of interference fitted joints. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress*

14. Jiang, X. J.; Zhang, Y. Y.; Yuan, S.X. Analysis of the contact stresses in curvic couplings of gas turbine in a blade-off event. *Strength Mater.* 2012, 44, 539–550.

15. Yuan, S. X.; Zhang, Y. Y.; Zhang, Y.C.; Jiang, X.J. Stress distribution and contact status analysis of a bolted rotor with curvic couplings. *Proc. I. Mech. Eng. C–J. Mec.* 2010, 224, 1815–1829.

16. Richardson, I. J.; Hyde, T. M.; Becker, A. A.; Taylor, J.W. A three-dimensional finite element investigation of the bolt stresses in an aero-engine curvic coupling under a blade release condition. *Proc. Inst. Mech. Eng. G–J. Aerosp. Eng.* 2000, 214, 231–245.

17. Croccolo, D.; Cuppini, R.; Vincenzi, N. Friction coefficient definition in compression-fit couplings applying the DOE method. *Strain* 2008, 44, 170–179.

18. RR71, Friction in Temporary Works, ISBN 0 7176 2613 X, HSE Books. URL: <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr071.htm> (accessed on 10 June 2024).

19. Pirozhkov V.G., Sobolev A.N., Nekrasov A.Ya., Arbuzov M.O. Automated design and modeling in mechanical engineering: orthogonal cylindrical-bevel gears. *Proceedings of the Russian State University of Oil and Gas named after. THEM. Gubkina*. 2019. No. 2. P. 95–106.

20. Abruzzo, M.; Macoretta, G., Romoli, L., Veracini, M. Technological and contact analysis of Hirth joints including manufacturing tolerances. *Precision Engineering*, 2024, 86, 66–74.

21. Kim, B. J., Oh, J., Palazzolo, A. Test and Theory for a Refined Structural Model of a Hirth Coupling. *ASME. J. Eng. Gas Turbines Power*, 2022, 144, 031027.

22. Kim, B. J., Oh, J., Palazzolo, A. Beam based rotordynamics modelling for preloaded Hirth, Curvic and butt couplings. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 565, 117921.

Информация об авторах

Соболев Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры станков, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
t-64@mail.ru

Некрасов Алексей Яковлевич – кандидат технических наук, доцент кафедры станков, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
a.nekrasov@stankin.ru

Ривкин Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры станков, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
alexey-rivkin@yandex.ru

Information about the authors

Sobolev Alexander Nikolaevich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Machine tools”, MSUT “STANKIN”
t-64@mail.ru

Nekrasov Alexey Yakovlevich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Machine tools”, MSUT “STANKIN”
a.nekrasov@stankin.ru

Rivkin Alexey Vladimirovich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “Machine tools”, MSUT “STANKIN”
alexey-rivkin@yandex.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 51–56.

УДК 621.992.5

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 51–56.

В.А. Гречишников, Г.А. Самсоненко, А.Р. Мирзомахмудов ✉

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

✉ Автор для корреспонденции

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТРУБНЫХ РЕЗЬБ НА ОСНОВЕ ПЛАНЕТАРНОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

В статье рассматривается проектирование и разработка устройства для обработки резьбы труб нефтяного сортамента в пространстве устья скважин. Проведен анализ существующих решений, выявлены их основные недостатки, такие как необходимость использования громоздкого оборудования и ограниченная функциональность при работе с различными типами резьбы. В ответ на выявленные проблемы предложено новое портативное устройство, использующее метод планетарного фрезерования, что позволяет повысить производительность и улучшить качество обработки. Устройство отличается универсальностью благодаря возможности настройки шага и конусности резьбы, а также снижением нагрузки на инструмент за счет оптимальных режимов резания. Разработанная конструкция обеспечивает легкость транспортировки и установки, что делает устройство удобным для использования в полевых условиях.

В статье также представлены результаты патентного поиска и детализированное описание разработанного устройства с указанием его основных особенностей и преимущества по сравнению с аналогами.

Ключевые слова: обработка резьбы, планетарное фрезерование, фрезерование резьб, трубы нефтяного сортамента, пространство устья, устье скважин, портативное устройство.

Для цитирования: Гречишников В.А., Самсоненко Г.А., Мирзомахмудов А.Р. Повышение производительности и снижение эксплуатационных затрат при обработке трубных резьб на основе планетарной фрезерной обработки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 51–56.

V.A. Grechishnikov, G.A. Samsonenko, A.R. Mirzomakhmudov ✉

MSUT “STANKIN”

✉ Corresponding author

INCREASING PRODUCTIVITY AND REDUCING OPERATING COSTS FOR PIPE THREAD MACHINING BASED ON PLANETARY MILLING

Abstract

The article deals with the design and development of a device for processing of oil grade pipe threads in the wellhead space. The existing solutions are analyzed, their main disadvantages are identified, such as the need to use bulky equipment and limited functionality when working with different types of threads. In response to the identified problems, a new portable device utilizing the planetary milling method is proposed, which allows to increase productivity and improve the quality of processing. The device is characterized by its versatility due to the ability to customize thread pitch and taper, as well as by the reduction of tool load due

to optimal cutting modes. The developed design provides easy transportation and installation, which makes the device convenient for use in the field.

The article also presents the results of the patent search and a detailed description of the developed device with an indication of its main features and advantages compared to analogues.

Keywords: thread processing, planetary milling, thread milling, oil-grade pipes, wellhead, portable device.

For citation: Grechishnikov V.A., Samsonenko G.A., Mirzomakhmudov A.R. Increasing productivity and reducing operating costs for pipe thread machining based on planetary milling. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2025. No 1 (72). P. 51–56. (In Russian)

Введение

Обработка резьбы труб нефтяного сортамента является одной из основных операций в процессе эксплуатации нефтяных и газовых скважин. Резьбовые соединения обеспечивают герметичность и надежность соединений, что напрямую влияет на безопасность и эффективность буровых и эксплуатационных работ. В условиях пространства устья скважин обработка резьбы труб представляет собой сложную проблему, требующую применения специализированного оборудования. Существующие устройства для обработки резьбы труб часто громоздки, требуют использования стационарного оборудования и не всегда подходят для работы в полевых условиях. Эти ограничения создают потребность в разработке портативных и универсальных решений.

Основные решения этой проблемы на рынке оборудования сталкиваются с рядом существенных недостатков, таких как необходимость использования тяжелого оборудования, ограниченная настройка под различные типы резьбы, высокая стоимость переоснащения и сложность эксплуатации. Кроме того, использование традиционных методов, таких как токарная обработка с помощью резцов, приводит к износу инструмента и снижению качества обработки из-за невозможности эффективного охлаждения рабочей зоны. Эти проблемы создают значительные затруднения при обслуживании и ремонте труб непосредственно на месте эксплуатации, что повышает издержки эксплуатации и время простоя оборудования.

На сегодняшний день существует необходимость в разработке инновационного решения данной проблемы, которое позволит повысить производительность и качество обработки резьбы труб непосредственно в пространстве устья скважин. Решение этих задач особенно важно в условиях постоянного роста требований к надежности и эффективности оборудования в нефтегазовой отрасли.

Целью данного исследования является разработка нового устройства для обработки резьбы труб

в пространстве устья скважин, которое позволит устранить недостатки существующих решений. Задачи статьи состоят из анализа существующих технологий и устройств, выявления их основных недостатков, разработки нового устройства с использованием кинематики планетарного фрезерования, а также сравнения его эффективности с аналогами.

Структура статьи включает обзор существующих устройств и технологий, описание разработанного устройства и его конструктивных особенностей, результаты сравнительного анализа, а также обсуждение преимуществ нового решения и его потенциала для применения в полевых условиях.

Анализ существующих решений устройств

В настоящее время на рынке представлены различные устройства для обработки резьбы труб нефтяного сортамента, однако, большинство из них имеют существенные ограничения, которые снижают их эффективность и удобство использования в полевых условиях, особенно в пространстве устья скважин. Анализ существующих решений показал, что существующие устройства обладают рядом недостатков, которые препятствуют их широкому применению [7].

Существующие устройства для обработки резьбы в основном используют традиционные методы токарной обработки с помощью резцов. Примером таких решений являются устройства, в которых в качестве привода главного движения используется гидроцилиндр, а для задания конусности резьбы применяются специальные резьбовые копиры. В качестве режущего инструмента используются 3–4 токарных резца. Данный подход имеет ряд недостатков:

- заниженные режимы резания из-за отсутствия подвода СОЖ в зону резания, что приводит к перегреву инструмента, снижению его износостойкости и ухудшению качества обработки резьбы;

- большой вес устройства (более 60 кг) затрудняет его эксплуатацию; устройства требуют высокой квалификации оператора для точной установки резцов относительно оси обрабатываемой трубы;
- нет органов настройки; устройства не многофункциональны, так как большинство из них предназначены только для обработки резьбы с фиксированной конусностью.

Анализ патентов показал, что существующие устройства стремятся устранить выявленные недостатки, но все еще сталкиваются с рядом проблем:

Патент на изобретение RU 2190078 C2 [2]. Название: Устройство для нарезания резьбы на трубах на устье скважин. Авторы: Матвеев В.М., Яковенко Н.А., Кузнецов В.Г., Сгибнев А.Д.

Основным недостатком является фиксированная конусность (1:16) и большой вес, затрудняющий установку и настройку. Кроме того, закрепление на трубе осуществляется с помощью винтов, что требует дополнительной квалификации от оператора.

Патент на изобретение RU 2474671 C1 [1]. Название: Устройство для нарезания резьбы на трубах на устье скважин. Авторы: Матвеев В.М., Кузнецов В.Г., Петин В.А.

Конструкция была разделена на съемные модули для упрощения транспортировки. Однако, несмотря на улучшенную транспортируемость, устройство по-прежнему имеет недостаточную жесткость при обработке несколькими резцами одновременно и требует значительных усилий для установки.

Основные выявленные недостатки:

- высокая сложность и трудоемкость эксплуатации: процесс установки и настройки устройств требует значительных временных и трудовых затрат, что снижает их эффективность в полевых условиях;
- недостаточная гибкость и универсальность: невозможность быстрой адаптации под различные типы резьбы и профильные особенности труб делает устройства менее универсальными;
- проблемы с охлаждением и износом инструмента: традиционные методы резания не позволяют эффективно охлаждать режущий инструмент, что приводит к его быстрому износу и снижению качества обработки.

Анализ показал, что для повышения эффективности обработки резьбы труб на устье скважин необходимо новое подходящее устройство, которое будет легким, портативным и способным работать в широком диапазоне режимов резания. Требуется

инновационный метод обработки, который позволит устранить ограничения традиционных технологий, повысить производительность и обеспечить высокое качество обработки без необходимости использования тяжелого станочного оборудования [5].

Разработка устройства для планетарного фрезерования резьб в устье скважин

На основе анализа существующих решений была разработана новая конструкция устройства для обработки резьбы труб нефтяного сортамента в пространстве устья скважин [6]. Главной особенностью данного устройства является использование метода планетарного фрезерования, что позволяет значительно улучшить качество обработки, повысить производительность и снизить нагрузку на режущий инструмент. Предложенное устройство отличается портативностью, универсальностью и возможностью работы в различных полевых условиях. Масса устройства составила 40 кг, диаметр устройства $\varnothing 310$ мм, а длина 420 мм.

Новое устройство было разработано с учетом выявленных недостатков предшествующих решений. Целью разработки стало создание компактного и универсального оборудования, способного эффективно обрабатывать резьбу различных типов и профилей без необходимости использования громоздкого станочного оборудования (рис. 1). Применение метода планетарного фрезерования

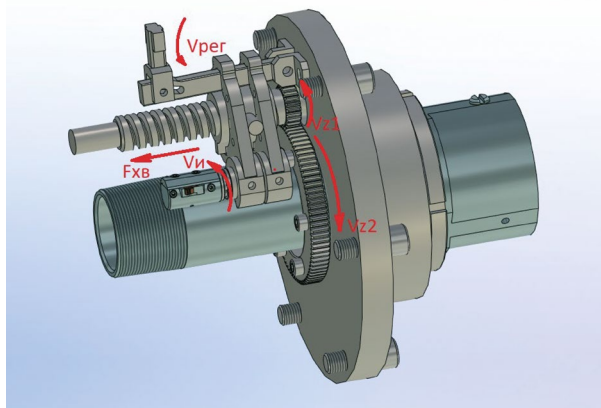


Рис. 1. Кинематическая схема устройства, где $F_{xв}$ – линейное перемещение узла режущего инструмента относительно ходового винта; V_u – вращение режущего инструмента; V_{z1} – вращение малого зубчатого колеса, сообщаемое внешним двигателем через ходовой винт; V_{z2} – вращение подвижной части устройства относительно гильзы, зафиксированной на трубе; $V_{пер}$ – проворот регулировочной планки относительно зафиксированной оси

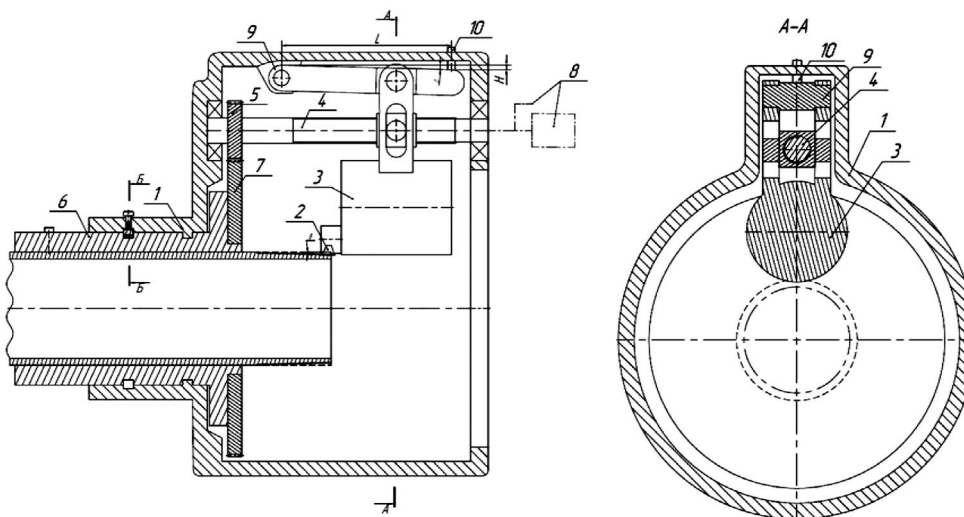


Рис. 2. Устройство для нарезания резьб на трубах в устье скважин, где: 1 – корпус устройства; 2 – механизм вращения и подачи режущего инструмента; 3 – электродвигатель; 4 – ходовой винт; 5 – малое зубчатое колесо; 6 – гильза; 7 – большое зубчатое колесо; 8 – привод вращения устройства; 9 – планка регулировки наклона движения; 10 – установочный винт

позволяет распределить нагрузку на инструмент и обеспечивает более стабильные и оптимальные режимы резания по сравнению с традиционными методами обработки. Конструктивное исполнение устройства представлено на рис. 2.

Устройство состоит из корпуса 1, внутри которого расположены механизмы подачи и вращения режущего инструмента; он изготовлен из легких, но прочных материалов, что обеспечивает высокую жесткость и снижает общий вес устройства; привода вращения и подачи инструмента, состоящего из зубчатой передачи и ходового винта; режущего инструмента в виде резьбовой фрезы; регулировочного винта и планки, которые позволяют устанавливать наклон траектории перемещения инструмента относительно заготовки; прижимных элементов для фиксации устройства на обрабатываемой трубе, обеспечивающих распределение веса и нагрузки по длине трубы, что предотвращает деформацию и повреждение установочной поверхности [4].

Обработка конических резьб осуществляется с помощью регулировочного винта 10, для установки регулировочной планки на угол β , равный конусности резьбы. Величина угла β определяется в формуле (1):

$$\arctan \beta = \frac{H}{L}, \quad (1)$$

где: H – глубина установки регулировочного винта; L – расстояние между осью крепления регулировочной планки и установочным винтом.

Z_1 и Z_2 – числа зубьев на зубчатых колёсах (2):

$$\frac{Z_2}{Z_1} = n, \quad (2)$$

$P_{винт}$ – шаг ходового винта (3):

$$\frac{P_{винт}}{n} = P, \quad (3)$$

где n – количество оборотов винта за время одного обката зубчатого колеса вокруг зубчатого колеса, что обеспечивает круговую подачу на зуб инструмента при планетарном формообразовании резьбы; P – шаг обрабатываемой резьбы.

Для точной настройки устройства предусмотрен привод вращения ходового винта и регулировочная планка, которая шарнирно закреплена одним концом на внутренней стенке корпуса и соединена с ходовым винтом и электродвигателем. Регулировочный винт, установленный в корпусе, взаимодействует с другим концом планки, позволяя изменять параметры работы устройства. Для замедления движения первого зубчатого колеса вокруг второго в конструкции предусмотрен фрикционный элемент, расположенный между корпусом и гильзой. Эти конструктивные особенности обеспечивают стабильную и точную работу устройства, улучшая качество нарезки резьбы и снижая нагрузку на режущий инструмент [3].

На основе эскиза была разработана трёхмерная модель устройства (рис. 3).

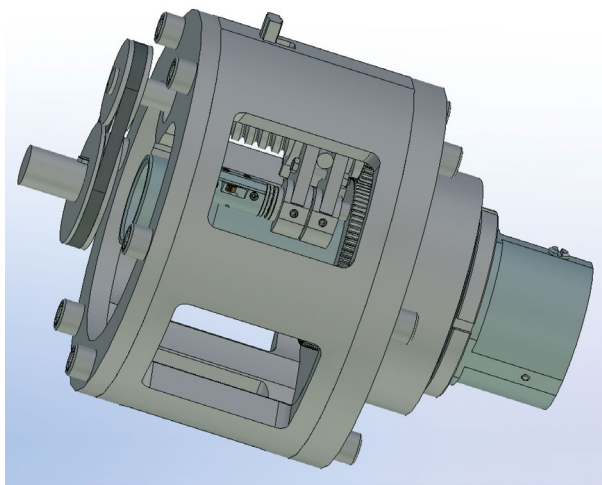


Рис. 3. Трёхмерная модель разработанного устройства

Выводы

Разработанное устройство имеет ряд преимуществ:

- Универсальность: возможность настройки под различные типы резьбы и углы конусности делает устройство пригодным для использования в широком спектре задач.
- Повышенная производительность: метод планетарного фрезерования обеспечивает высокую скорость обработки и снижает износ инструмента.
- Портативность и удобство эксплуатации: легкая конструкция и простота установки делают устройство идеальным для использования в полевых условиях, что особенно важно для работ на устье скважин.
- Снижение эксплуатационных затрат: минимизация количества узлов и деталей повышает надежность устройства и снижает затраты на обслуживание.

Библиографический список

1. Пат. 2474671 Российская Федерация, МПК E21B 17/00. Устройство для нарезания резьбы на трубах на устье скважин / Матвеев В.М., Кузнецов В.Г., Петин В.А., заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром газобезопасность» – № 2012110065/03 заявл. 15.03.2012 г.; опубл. 10.02.2013 г., Бюл. № 4
2. Пат. 2190078 Российская Федерация, МПК E21B 17/00. Устройство для нарезания резьбы на трубах на устье скважин / Матвеев В.М., Яковенко Н.А., Кузнецов В.Г., Сгибнев А.Д. заявитель и патен-

тообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газобезопасность» – № 2000109401/03, заявл. 14.04.2000 г.; опубл. 27.09.2002 г., Бюл. № 27

3. Пат. 204572 Российская Федерация, МПК B23G 5/18. Резьбофреза / Самсоненко Г.А., Косарев В.А., Мирзомахмудов А.Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – № 2020136706; заявл. 09.11.2020 г.; опубл. 31.05.2021 г., Бюл. № 16 – 1 с.: ил.

4. Цыбрий И.К., Коваль Н.С., Исабеков Ж.Н. Исследование параметров конических резьб, влияющих на качество соединения труб нефтяного сортамента. *Advanced Engineering Research*, 2022.

5. Косарев В.А., Гречишников В.А. Инновационные конструкции металлообрабатывающего инструмента для высокотехнологичных машиностроительных производств // Справочник. Инженерный журнал. 2011. – № 12. – С. 38–43.

6. Пат. 2726744 Российская Федерация, МПК B23G 1/24. Приспособление для нарезания резьбы на трубах вне станка / Самсоненко Г.А., Косарев В.А., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – № 2019123668 заявл. 26.07.2019 г.; опубл. 15.07.2020 г., Бюл. № 20.

7. Гречишников В.А. Наука и искусство системного моделирования инструментального обеспечения машиностроительных производств. КУРС, 2016. – 376 с.

References

1. Pat. 2474671 Russian Federation, CPC E21B 17/00. Device for threading pipes at the wellhead / Matveev V.M., Kuznetsov V.G., Petin V.A., applicant and patentee Limited Liability Company “Gazprom Gazobezопасnost” – № 2012110065/03 filed. 15.03.2012; published 10.02.2013, Bulletin No. 4.
2. Pat. 2190078 Russian Federation, CPC E21B 17/00. Device for thread cutting on pipes at the wellhead / Matveev V.M., Yakovenko N.A., Kuznetsov V.G., Sgibnev A.D. Applicant and patentee Limited Liability Company “Gazobezопасnost” – No. 2000109401/03, filed. 14.04.2000; published on 27.09.2002, Bulletin No. 27.
3. Pat. 204572 Russian Federation, CPC B23G 5/18. Thread cutter / Samsonenko G.A., Kosarev V.A., Mirzomakhmudov A.R.; applicant and patentee FGBOU VO “MSTU ‘STANKIN’”. – No. 2020136706; applied for. 09.11.2020; published 31.05.2021, Bulletin No. 16 – 1 p.: ill.
4. Tsybriy I.K., Koval N.S., Isabekov J.N. Study of tapered thread parameters affecting the quality of oil grade pipe joints. *Advanced Engineering Research*, 2022.

5. Kosarev V.A., Grechishnikov V.A. Innovative designs of metalworking tools for high-tech machine-building productions. *Reference. Engineering Journal*. № 12. 2011. P. 38–43.

6. Pat. 2726744 Russian Federation, CPC B23G 1/24. Fixture for thread cutting on pipes outside the machine /

Samsonenko G.A., Kosarev V.A., applicant and patentee FGBOU VO “MSTU ‘STANKIN’”. – No. 2019123668 filed. 26.07.2019; published 15.07.2020, Bulletin No. 20.

7. Grechishnikov V.A. Science and the art of system modeling of tool support of machine-building industries production. KURS, 2016 – 376 p.

Информация об авторах

Гречишников Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор кафедры инструментальной техники и технологии формообразования, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
v.grechishnikov@stankin.ru

Самсоненко Григорий Андреевич – аспирант кафедры инструментальной техники и технологии формообразования, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
samsonenko_gr@mail.ru

Мирзомахмудов Азимжон Рустамович – аспирант кафедры инструментальной техники и технологии формообразования, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
mirzoazim97@mail.ru

Information about the authors

Grechishnikov Vladimir Andreevich – D.Sc. of Engineering, Professor at the sub-department of “Cutting Tools and Form-Generation Technologies”, MSUT “STANKIN”
v.grechishnikov@stankin.ru

Samsonenko Grigoriy Andreevich – postgraduate student at the sub-department of “Cutting Tools and Form-Generation Technologies”, MSUT “STANKIN”
samsonenko_gr@mail.ru

Mirzomakhmudov Azimzhon Rustamovich – postgraduate student at the sub-department of “Cutting Tools and Form-Generation Technologies”, MSUT “STANKIN”
mirzoazim97@mail.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 57–65.

УДК 621.9

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 57–65.

Л.Д. Малькова

МГТУ им. Н.Э. Баумана

ОЦЕНКА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКОСТЕЙ

Аннотация

На основании выявленной ранее гипотезы о зависимости энергопотребления от площади поверхности резания, подтвержденной на торцовом и цилиндрическом фрезеровании, проведен совокупный математический анализ результатов по четырем способам обработки. Представлены результаты экспериментальных исследований и аналитических расчетов энергопотребления при строгании и протягивании плоскости, выполненных для условий, аналогичных фрезерованию. Определены площади поверхности резания, формируемые режущим лезвием инструментов для указанных условий обработки. Установлено и математически подтверждено, что выявленная гипотеза может быть обобщена на способы обработки с различными кинематическими схемами, но с аналогичными условиями резания.

Ключевые слова: энергопотребление, механическая обработка, сила резания, строгание, протягивание

Для цитирования: Малькова Л.Д. Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 57–65.

L.D. Malkova

Bauman Moscow State Technical University

ESTIMATION OF ENERGY CONSUMPTION DURING MACHINING OF PLANES

Abstract

Based on the previously identified hypothesis about the dependence of energy consumption on the area of the cutting surface, confirmed by end and cylindrical milling, a cumulative mathematical analysis of the results for four processing methods was carried out. The results of experimental studies and analytical calculations of energy consumption during planing and broaching of the plane, performed for conditions similar to milling, are presented. The cutting surface areas formed by the cutting blade of the tools for the specified processing conditions are determined. It has been established and mathematically confirmed that the revealed hypothesis can be generalized to processing methods with different kinematic schemes, but with similar cutting conditions.

Keywords: energy consumption, mechanical processing, cutting force, planing, broaching

For citation: Malkova L.D. Estimation of energy consumption during machining of planes. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 57–65. (In Russian)

Введение

Обеспечение эффективности современного производства – задача многоплановая, включающая в себя десятки показателей, совокупность которых формирует соответствующие критерии оценки. Указанные критерии часто противоречат друг другу. Например, рост производительности и снижение себестоимости обычно имеют разнонаправленные тенденции изменения. Поэтому достижение целевой функции обеспечения эффективности производства является оптимизационной задачей, в которой значимость каждого из критериев оптимизации задает конкретная производственная, экономическая, социальная или иная ситуация.

Одной из важнейших составляющих целого ряда критериев, а иногда и самостоятельным критерием, является энергетическая эффективность. В федеральном законе № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» это понятие определяется как характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю.

Технологические процессы, являющиеся самостоятельным объектом обеспечения энергетической эффективности, требуют решения задачи энергосбережения, что, в соответствии № 261-ФЗ, является реализацией организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования (в том числе объема произведенной продукции, выполненных работ, оказанных услуг).

Область механической обработки относится к группе технологических мер. Поэтому вопросы оценки и, как следствия, управления энергопотреблением при обработке резанием являются актуальными.

Постановка задачи

Вопросы энергосбережения в производственных процессах в целом и при механической обработке в частности рассматриваются исследователями с разных сторон. Разрабатываются и внедряются

системные подходы [1, 2], проводится оптимизация работы металлорежущего оборудования для локальных задач [3], разрабатываются методики использования безразмерных показателей энергетической эффективности [4 – 6] и т.д. Но все-таки большинство авторов опираются на модели силовых характеристик процессов механической обработки, рассматривая снижение силы резания как основу энергосбережения. Определение составляющих силы резания проводится исследователями на основе теоретических положений и схем, например, для сложных поверхностей [7 – 11], или на основе математических моделей, полученных экспериментально. В случае использования степенных зависимостей их точность повышается за счет увеличения количества замеров и введение дополнительных коэффициентов [12]. А для полиномиальных моделей большое значение имеет корректность факторов, составленных планов и последующей обработки результатов.

Хотя сила резания в определении энергопотребления играет существенную роль, прямой зависимости между ними не существует, т.к. изменение силы резания, связанное с параметрами режима обработки, приводит к соответствующему изменению основного технологического времени. Указанные тенденции часто носят разнонаправленный характер. Поэтому существует еще один сегмент в исследованиях по энергосбережению в механической обработке – это выявление наиболее эффективных технологических цепочек, в русле которого и выполнена данная работа.

Прямое измерение расхода электрической энергии, как и потребляемой мощности, при механической обработке весьма затруднительно. Контролирующие приборы обычно устанавливаются таким образом, что на их показания оказывает влияние не только полезная энергия, идущая на срезание припуска, но и обеспечение работы всех узлов станка на холостом ходу, и дополнительные потери. Поэтому наиболее точно полезную энергию можно определить через контроль составляющих силы резания и последующем пересчете по формуле:

$$E = P_z \cdot v \cdot t_o = P_z \cdot v \cdot \frac{L}{1000 \cdot v} = \frac{P_z \cdot L}{1000}, \quad (1)$$

где E – потребляемая энергия, Дж, P_z – главная составляющая силы резания, Н, v – скорость резания, м/мин, L – длина обработки, мм, t_o – основное технологическое время, мин.

В работе [13] была выдвинута гипотеза о корреляции между потребляемой энергией на обработку заданной поверхности и площадью поверхности резания, которую формирует режущее лезвие инструмента в процессе указанной обработки. Гипотеза была проверена экспериментально и подтверждена для двух способов фрезерования плоской открытой поверхности – торцового и цилиндрического. Эксперименты были проведены при следующих условиях: скорость резания $v = 25$ м/мин, подачи на зуб $S_z = 0,05; 0,062; 0,08; 0,1$ мм/зуб, глубина резания $t = 1$ мм, ширина фрезерования $B = 6; 9; 12; 15; 18; 21; 24; 27$ мм.

На данном этапе исследования ставится задача расширения способов обработки, приведенных к той же самой поверхности, но имеющих иную кинематическую схему. В частности, следует рассмотреть строгание открытой плоскости, имеющее прямолинейное главное движение резания и движение подачи на двойной ход, и протягивание, работающее только с прямолинейным главным движением резания. Расчет площади поверхности резания при указанных кинематических схемах в корне отличается от расчетов при фрезеровании, что позволит считать возможную корреляцию общим случаем, не зависимым от схемы снятия припуска.

Для обеспечения сопоставимости условий разных способов обработки следует учесть следующие аспекты:

- использование одной и той же заготовки (сталь 45, 200 НВ),
- использование одних и тех же блоков контрольно-измерительной аппаратуры для фиксирования и регистрации силовых характеристик процесса резания,
- использование инструментов из одного и того же инструментального материала (сталь Р6М5 ГОСТ 1887-73) и с одинаковыми элементами режущего лезвия ($\alpha = 9^\circ$, $\gamma = 4^\circ$),
- проведение замеров при близких значениях скорости резания v и одинаковых значениях глубины резания t ,
- совпадение длины и ширины обрабатываемой плоскости.

Определение энергопотребления при строгании

Для определения главной составляющей силы резания при строгании и последующем расчете энергопотребления для данного способа обработки собрана динамометрическая установка, вклю-

чающая поперечно-строгальный станок модели 7Б35, динамометр Kistler 9257В, усилитель преобразователь 5070А Kistler и блок АЦП 5697 Kistler. В качестве инструмента использовались строгальные резцы с главными углами в плане $\varphi = 15^\circ$ и 45° и вспомогательными углами в плане $\varphi' = 32^\circ$ и 15° соответственно, что позволило расширить диапазон значений площади поверхности резания. Скорость резания составила $v = 24,8$ м/мин при следующих назначенных подачах на двойной ход: $S_{дв.х} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ мм/дв.х. Остальные условия эксперимента в полной мере соответствовали перечисленным ранее требованиям сопоставимости.

На *рис. 1* представлен эскиз обработки при строгании, а на *рис. 2* элемент графика регистрируемой составляющей силы резания P_z (в частности, при строгании с параметрами $\varphi = 15^\circ$ и $S_{дв.х} = 0,4$ мм/дв.х).

Величина силы резания определялась как разница между средними значениями уровней «нуля» и нагрузки. Количество повторений $N = 4$.

Протокол экспериментальных исследований главной составляющей P_z силы резания при строгании заготовки из стали 45 твердостью 200 НВ резцами из быстрорежущей стали и энергопотребления E на один рез на длине 100 мм представлены в *табл. 1*, а результаты расчета энергопотребления E для обработки плоскости длиной 100 мм для различных значений ширины строгания и при различных подачах приведены в *табл. 2*.

Схема расчета площади поверхности резания при строгании представлена на *рис. 3*. Резание является несвободным, поэтому в каждом резе принимают участие главная и вспомогательная режущие

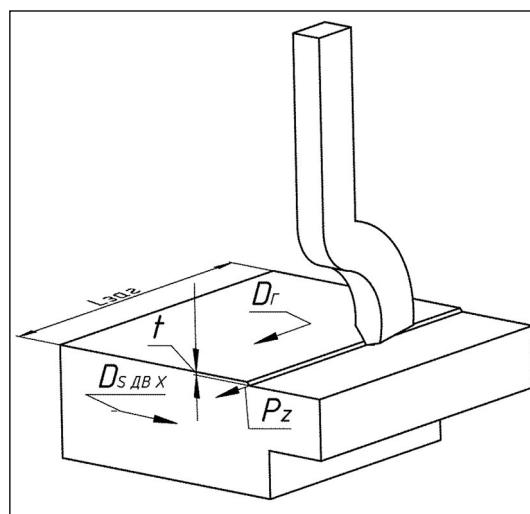


Рис. 1. Эскиз обработки при строгании

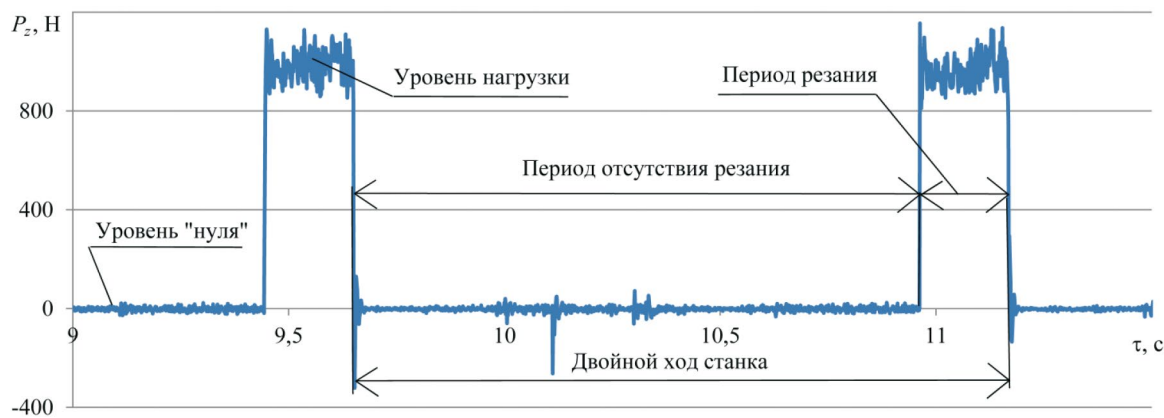


Рис. 2. Элемент графика регистрируемой составляющей силы резания P_z при строгании

Таблица 1

Протокол экспериментальных исследований главной составляющей силы резания при строгании заготовки из стали 45 резцами из быстрорежущей стали и энергопотребления на один рез на длине 100 мм

Подача на двойной ход, $S_{дв.х}$, мм/дв.х	Сила резания P_z , Н		Энергопотребление E , Дж, на один рез на длине 100 мм	
	Угол ϕ , град			
	15	45	15	45
0,2	605	509	60,51	50,93
0,4	993	986	99,32	98,60
0,6	1345	1369	134,48	136,88
0,8	1762	1746	176,20	174,59
1,0	2222	2075	222,15	207,53

Таблица 2

Результаты расчета энергопотребления при строгании плоскости длиной 100 мм

Подача на двойной ход $S_{дв.х}$, мм	Энергопотребление E , Дж, при ширине строгания, мм															
	6		9		12		15		18		21		24		27	
	Угол ϕ , град															
	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45
0,2	1815	1528	2723	2292	3631	3056	4538	3820	5446	4584	6353	5348	7261	6112	8169	6876
0,4	1490	1479	2235	2219	2980	2958	3725	3698	4469	4437	5214	5177	5959	5916	6704	6656
0,6	1345	1369	2017	2053	2690	2738	3362	3422	4034	4106	4707	4791	5379	5475	6052	6160
0,8	1321	1309	1982	1964	2643	2619	3304	3273	3964	3928	4625	4583	5286	5238	5947	5892
1	1333	1245	1999	1868	2666	2490	3332	3113	3999	3736	4665	4358	5332	4981	5998	5603

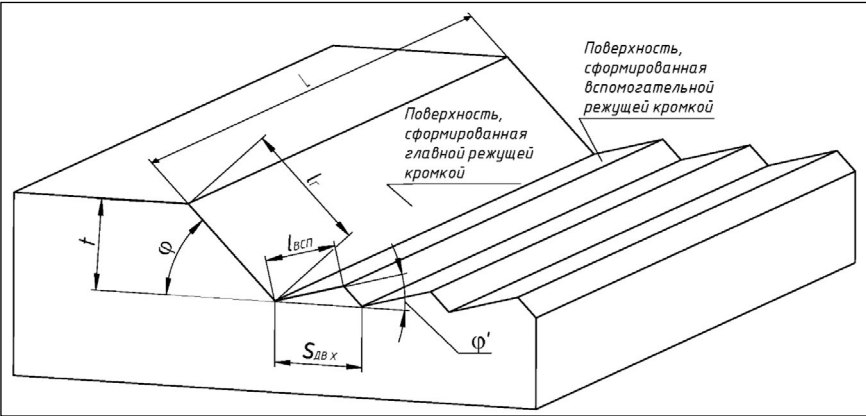


Рис. 3. Схема расчета площади поверхности резания при строгании

кромки. Причем главная режущая кромка формирует площадь, равную произведению ее рабочей длины $l_Г$ на длину обработки L . В свою очередь, из рисунка видно, что величина $l_Г$ может быть определена как отношение глубины резания t к синусу главного угла в плане φ .

Длина рабочей части вспомогательной режущей кромки определяется несложными вычислениями с использованием теоремы синусов через величину подачи на двойной ход и главный φ и вспомогательный φ' углы в плане.

В результате чего для расчета площади поверхности резания $S_{нов}$ использованы следующие зависимости:

$$S_{нов} = S_{нов\,г} + S_{нов\,всп}, \tag{2}$$

где $S_{нов\,г}$ – площадь поверхности, сформированной главной режущей кромкой:

$$S_{нов\,г} = l_Г \cdot L = \frac{t \cdot L}{\sin \varphi} ; \tag{3}$$

$S_{нов\,всп}$ – площадь поверхности, сформированной вспомогательной режущей кромкой:

$$S_{нов\,всп} = l_{всп} \cdot L = \frac{S_{ДВХ} \cdot \sin \varphi}{\sin (\varphi + \varphi')} \cdot L. \tag{4}$$

Результаты расчета площадей поверхности резания $S_{нов}$ для обработки плоскости длиной 100 мм для различных значений ширины строгания и при различных подачах приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета площади поверхности резания при строгании плоскости длиной 100 мм

Подача на двойной ход $S_{дв.х}$, мм	Площадь поверхности резания $S_{нов}$, мм ² при ширине строгания, мм															
	6		9		12		15		18		21		24		27	
	Угол φ , град															
	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45	15	45
0,2	11803	4733	17705	7099	23607	9465	29509	11831	35410	14198	41312	16564	47214	18930	53115	21296
0,4	6008	2611	9012	3917	12016	5222	15020	6528	18024	7834	21028	9139	24032	10445	27036	11750
0,6	4076	1904	6114	2856	8152	3808	10190	4760	12228	5712	14266	6664	16304	7616	18342	8569
0,8	3110	1551	4665	2326	6220	3101	7775	3876	9330	4652	10885	5427	12440	6202	13996	6978
1	2531	1338	3796	2008	5061	2677	6326	3346	7592	4015	8857	4684	10122	5354	11388	6023

Определение энергопотребления при протягивании

В соответствии с поставленной целью при полном сохранении требований, обеспечивающих соответствия экспериментов, произведен расчет энергопотребления при протягивании плоскостей, имеющих те же размеры, что и при строгании и ранее при фрезеровании.

Усилия протягивания принято определять по удельной силе, приведенной к одному миллиметру режущей кромки. Поэтому для снятия припуска $t = 1$ мм наружной быстрорежущей протяжкой из стали Р6М5 с заготовки из стали 45 твердостью 200 НВ с принятыми подачами на зуб $S_z = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$ мм/зуб, шириной $B = 6; 9; 12; 15; 18; 21; 24; 27$ мм и длиной $L = 100$ мм использована методика, представленная в [14].

$$E = p \cdot B \cdot L \cdot \frac{t}{S_z \cdot 1000}, \quad (5)$$

где E – энергопотребление, Дж; p – удельная нагрузка на 1 мм режущей кромки для обработки конструкционных сталей, Н/мм; B – ширина обработки, мм; L – длина обработки, мм; t – припуск под обработку, мм; S_z – подача на зуб, мм/зуб.

Расчет площади поверхности резания проведен в соответствии со схемой, представленной на рис. 4, по формуле:

$$S_{нов} = B \cdot L \cdot \frac{t}{S_z}.$$

Результаты расчета усилия протягивания для указанных условий и площадей поверхности резания, формируемой при этой обработке, приведены в табл. 4 и 5 соответственно.

Сводное графическое отображение результатов зависимости энергопотребления E при торцовом и цилиндрическом фрезеровании, строгании и протягивании плоскости нескольких размеров с разными подачами приведено на рис. 5.

Анализ результатов проведенных экспериментов и расчетов позволяет выделить общую для четырех способов обработки тенденцию изменения энергопотребления от площади поверхности резания. Расположение точек на графике соответствует степенной зависимости. Эту гипотезу подтвердила выполненная аппроксимация данных. С коэффициен-

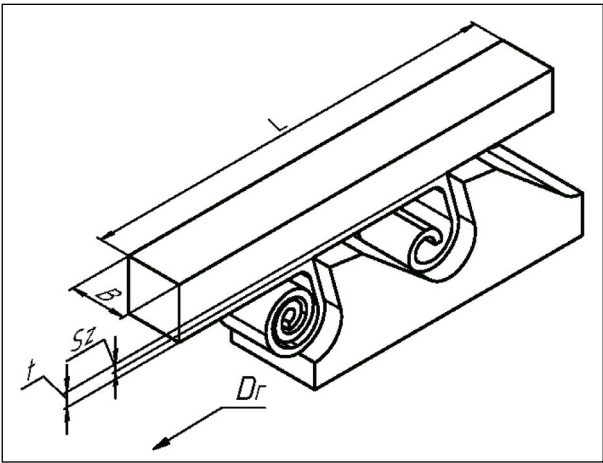


Рис. 4. Схема обработки при протягивании

Таблица 4

Результаты расчета энергопотребления E при протягивании плоскости протяжкой из быстрорежущей стали Р6М5 заготовки из стали 45

Подача на зуб S_z , мм/зуб	Удельная нагрузка на 1 мм режущей кромки p , Н/мм	Энергопотребления E , Дж, при ширине протягивания B , мм							
		6	9	12	15	18	21	24	27
0,05	181	2172	3258	4344	5430	6516	7602	8688	9774
0,1	273	1638	2457	3276	4095	4914	5733	6552	7371
0,15	379	1516	2274	3032	3790	4548	5306	6064	6822
0,2	473	1419	2129	2838	3548	4257	4967	5676	6386

Таблица 5

Результаты расчета площади поверхности резания $S_{нов}$ при протягивании плоскости

Подача на зуб S_z , мм/зуб	Площадь поверхности резания $S_{нов}$, мм ² , при ширине протягивания B , мм							
	6	9	12	15	18	21	24	27
0,05	12000	18000	24000	30000	36000	42000	48000	54000
0,1	6000	9000	12000	15000	18000	21000	24000	27000
0,15	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000
0,2	3000	4500	6000	7500	9000	10500	12000	13500

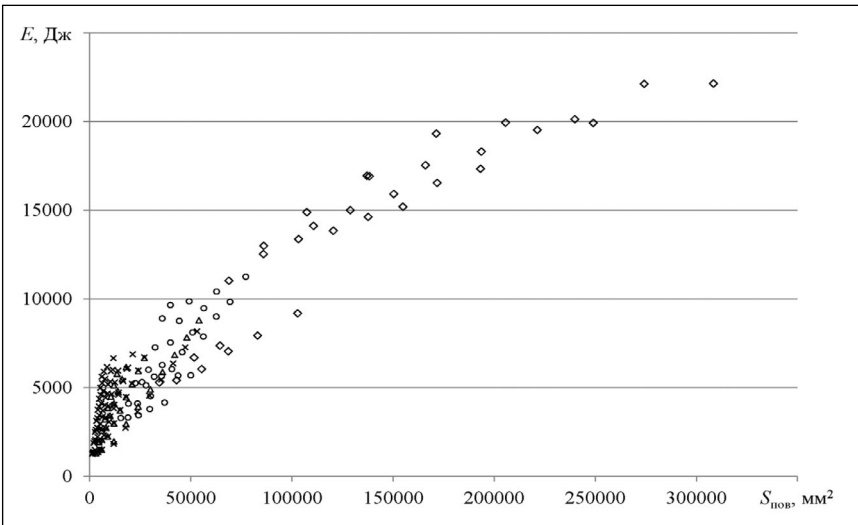


Рис. 5. Зависимости энергопотребления E при различных способах обработки плоскости длиной $L = 100$ мм и шириной B от 6 до 27 мм при различных подачах на зуб S_z (на дв.х $S_{ок.х}$) от площади поверхности резания $S_{нов}$: \circ – торцовое фрезерование; \diamond – цилиндрическое фрезерование; \times – строгание; Δ – протягивание

том корреляции, превышающем 0,9, обобщенная зависимость выглядит следующим образом:

$$E = 39,45 \cdot S_{нов}^{0,493}, \tag{7}$$

что, в свою очередь, подтверждает гипотезу о связи между потребляемой энергией на обработку заданной поверхности и площадью поверхности резания, которую формирует режущее лезвие инструмента в процессе указанной обработки вне зависимости от способа снятия припуска, геометрических параметров поверхности и величины подачи.

Использование полученной зависимости позволяет прогнозировать затрачиваемую энергию на обработку заготовок из стали 45 инструментами из быстрорежущей стали Р6М5 и, как следствие, управлять желаемыми результатами, т.е. способствовать энергосбережению в технологических процессах механической обработки. Для этого необходимо определить площадь поверхности

резания по формулам (2), (3), (4), (6) и [14], формируемую режущим лезвием, и оценить величину необходимой энергии по формуле (7). После чего принять решение о возможной корректировке параметров режима резания для уменьшения энергопотребления.

Выводы

Подтверждена гипотеза о связи между потребляемой энергией на обработку заданной поверхности и площадью поверхности резания, которую формирует режущее лезвие инструмента в процессе указанной обработки вне зависимости от способа снятия припуска, геометрических параметров поверхности и величины подачи.

Полученная степенная зависимость с коэффициентом корреляции более 0,9 для используемого в экспериментах сочетания инструментального и обрабатываемого материалов (быстрорежущая

сталь Р6М5 – сталь 45) позволяет утверждать, что с увеличением площади поверхности резания энергопотребление устойчиво возрастает.

Для реализации мер по энергосбережению можно варьировать в допустимых пределах параметрами режима резания, в частности, подачами и схемой разделения припуска по проходам.

Библиографический список

1. *Касимов Л.Н.* Ресурсосберегающие технологии механической обработки труднообрабатываемых материалов / Л. Н. Касимов; Касимов Л. Н.; М-во образования Рос. Федерации. Уфим. гос. ун-т сервиса. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2003. – 180 с. – ISBN 5-88469-120-3.

2. *Кузнецов А. П.* Структуры процессов и оборудования для обработки резанием. Часть 1. Энергоинформационная модель структуры процессов обработки / А. П. Кузнецов // Вестник машиностроения. – 2015. – № 2. – С. 73-83.

3. *Горленко О.А.* Распределение припуска между технологическими переходами при обработке отверстий резцами и осевым инструментом / О. А. Горленко, В. М. Малащенко, Н. А. Малащенко // Справочник. Инженерный журнал. – 2003. – № 4. – С.53-58.

4. *Игнатов С.Н.* Оценка эффективности лезвийной обработки с использованием безразмерного энергетического критерия / С.Н. Игнатов, А.В. Карпов, А.П. Распопин // СТИН: ежемесячный научно-технический журнал. Москва. 2004. №12. С. 23-26: табл. ISSN 0869-7566.

5. *Баранов А.В.* Оптимизация лезвийной обработки отверстий на основе энергетических критериев / А.В. Баранов // Вестник машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 47-50.

6. *Силин С.С.* Оптимизация операций механической обработки по энергетическим критериям / С.С. Силин, А.В. Баранов // СТИН. 1999. № 1. С.16-17.

7. *Мальков О.В.* Расчет силы резания при обработке внутренней резьбы гребенчатыми резьбовыми фрезами / О. В. Мальков, А. С. Карельский // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 3. – С. 92-100. – DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-3-92-100.

8. *Мальков О.В.* Теоретический расчет составляющих силы резания при резьбофрезеровании / О. В. Мальков, А. С. Карельский // Вестник Магнитогорского государственного технического

университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 44-55. – DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-4-44-55.

9. *Виноградов Д.В.* Исследование сил резания при криволинейном сечении срезаемого слоя / Д. В. Виноградов // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 2(65). – С. 23-31. – DOI 10.47617/2072-3172_2023_2_23. – EDN: EYPHVW.

10. *Мелкерис Т.В.* Определение силы резания для криволинейного сечения срезаемого слоя / Т.В. Мелкерис, Д.В. Виноградов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 12. – С. 124-135. – DOI 10.7463/1214.0745856.

11. *Malkov O.* Force modeling of thread milling / O. Malkov, A. S. Karelsky // AIP conference proceedings: 45th Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration, Moscow, Russia, 30 марта – 02 2021 года. Vol. 2549. – Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2021. – P. 170004.

12. *Malkov O.V.* Cutting Force Analysis During Thread Milling / O. V. Malkov, A. S. Karelskiy // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021): ICIE: International Conference on Industrial Engineering, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Vol. 2. – Челябинск: Springer, 2022. – P. 563-573. – DOI 10.1007/978-3-030-85230-6_67.

13. *Малькова Л.Д.* Оценка энергопотребления при механической обработке плоскостей различными способами фрезерования / Л. Д. Малькова // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2016. – № 12(60). – С. 7. – DOI 10.18698/2308-6033-2016-12-1559.

14. *Малевский Н.П.* Расчет комбинированных шлицевых протяжек: учеб. пособие по курсу «Основы проектирования режущих инструментов» / Н.П. Малевский, О.В. Мальков; Н.П. Малевский, О.В. Мальков; Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 44 с. – ISBN 5-7038-2527-X.

References

1. Kasimov, L. N. Resource-saving technologies of mechanical processing of hard-to-process materials / L. N. Kasimov; Kasimov L. N.; Ministry of Education of the Russian Academy of Sciences. Federations. Ufa State University of Service. Ufa: Designpoligrafservice LLC, 2003. 180 p. ISBN 5-88469-120-3.

2. Kuznetsov A.P. Structures of processes and equipment for cutting processing. Part 1. Energy informational model of structure of manufacturing processes.

- Bulletin of Mechanical Engineering*. 2015. No. 2. pp. 73-83.
3. Gorlenko O.A., Malashenko V. M., Malashenko N.A. The distribution of the allowance between technological transitions when working holes with cutters and axial tools. *Handbook. Engineering Journal*, 2003, No. 4, pp.53-58.
 4. Ignatov, S. N. Evaluation of the effectiveness of blade processing using an infinite energy criterion / S.N. Ignatov, A.V. Karpov, A.P. Raspopin. *STIN: monthly scientific and technical journal*. Moscow. 2004. No. 12. pp. 23-26; table. ISSN 0869-7566.
 5. Baranov A.V. Energy optimization of hole cutting. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2011. No. 3. P. 47–50.
 6. Silin, S.S. Optimization of mechanical processing operations for energy criteria / S.S. Silin, A.V. Baranov. *STIN*. 1999. No. 1. pp.16-17.
 7. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Calculation of Cutting Force when Machining Internal Threads with Thread Milling Cutters. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2024, vol.22, No.3, pp.92-100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-92-100>
 8. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Theoretical Calculation of the Components of Thread Milling Cutting Forces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2023, vol. 21, No. 4, pp. 44-55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-44-55>
 9. Vinogradov D.V. Investigation of cutting forces at a curved section of the cut laye. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2023. No. 2(65). P. 23-31. DOI 10.47617/2072-3172_2023_2_23. EDN: EYPHVW.
 10. Melkeris, T. V. Determination of the cutting force for a curved section of the cut layer / T.V. Melkeris, D.V. Vinogradov. *Science and Education: scientific edition of the Bauman Moscow State Technical University*. 2014. No. 12. pp. 124–135. DOI 10.7463/1214.0745856.
 11. Malkov, O. Force modeling of thread milling / O. Malkov, A. S. Karelskiy. AIP conference proceedings: 45th Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration, Moscow, Russia, March 30 – April 02, 2021. Vol. 2549. Moscow, Russia: American Institute of Physics Inc., 2021. P. 170004.
 12. Malkov, O. V. Cutting Force Analysis During Thread Milling / O. V. Malkov, A. S. Karelskiy // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021): ICIE: International Conference on Industrial Engineering, Sochi, May 17–21, 2021. Vol. 2. Chelyabinsk: Springer, 2022. P. 563–573. DOI 10.1007/978-3-030-85230-6_67.
 13. Malkova L.D. Estimating power consumption for flat surface machining employing various milling techniques. *Engineering Journal: Science and Innovation*. – 2016. No. 12(60). P. 7. DOI 10.18698/2308-6033-2016-12-1559.
 14. Malevsky, N. P. Calculation of combined spline broaches: textbook. course manual “Fundamentals of cutting tools design” / N. P. Malevsky, O. V. Malkov; N. P. Malevsky, O. V. Malkov; Moscow State Technical University. N. E. Bauman University. Moscow: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2004. 44 p. ISBN 5-7038-2527–X.

Информация об авторе

Малькова Людмила Дмитриевна – кандидат технических наук, доцент кафедры инструментальной техники и технологий, МГТУ им. Н.Э. Баумана
ldm@bmstu.ru

Information about the author

Malkova Lyudmila Dmitrievna – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Instrumental engineering and technology”, Bauman Moscow State Technical University
ldm@bmstu.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declare no conflict of interest.

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 66–72.

УДК 621.7.011

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 66–72.

*Д.Ю. Колодяжный¹, С.О. Черкашин¹✉, С.Г. Ляпусов², В.П. Вороненко¹*¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»; ² АО «ММЗ «АВАНГАРД»

✉ Автор для корреспонденции

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ДЛИННЫХ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ ВНС-2 ПРИ ПЛОСКОМ ШЛИФОВАНИИ ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация

Данная статья раскрывает возможность обеспечения требуемой точности формы поверхностей длинных плоских деталей из стали ВНС-2 за счет назначения рациональных параметров режимов резания и термической обработки. Для хромоникелевых сталей мартенситного класса существует проблема их механической обработки ввиду большого количества легирующих элементов. Также у стали есть склонность к поглощению энергии, выделенной в ходе механической обработки, что в последствии может привести к накоплению энергии и проявлению её в виде деформации. Это сильно влияет на формируемые параметры точности формы обработанных поверхностей и, в ряде случаев, требуемое значение допуска не обеспечивается. Наклеп показывает соотношение возросшей твердости по отношению к исходной и может быть использован как один из способов контроля возникновения возможных остаточных деформаций в поверхностных слоях изделий. Немаловажное значение имеет микроструктура поверхностного слоя, которая оказывает значительное влияние на возникающие энергозатраты при механообработке, а также на возможное увеличение или уменьшение наклепа. Сделаны выводы по полученным результатам исследований.

Ключевые слова: мартенситная сталь, шлифование, микроструктура, наклеп, допуск.

Для цитирования: Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Ляпусов С.Г., Вороненко В.П. Обеспечение требуемой точности формы длинных плоских деталей из стали ВНС-2 при плоском шлифовании за счет изменяемых параметров режимов резания и термической обработки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 66–72.

*D.Yu. Kolodyazhny¹, S.O. Cherkashin¹✉, S.G. Lyapusov², V.P. Voronenko¹*¹ MSUT “STANKIN”; ² MMZ AVANGARD JSC

✉ Corresponding author

ENSURING THE REQUIRED SHAPE ACCURACY OF LONG FLAT PARTS MADE OF VNS-2 STEEL DURING FLAT GRINDING DUE TO VARIABLE PARAMETERS OF CUTTING MODES AND HEAT TREATMENT

Abstract

This article reveals the possibility of ensuring the required accuracy of the shape of the surfaces of long flat parts made of VNS-2 steel by assigning rational parameters of cutting modes and heat treatment. For chromium-nickel steels of the martensitic class, there is a problem of their mechanical processing due to the large number of alloying elements. Steel also has a tendency to absorb the energy released during machining,

which can subsequently lead to energy accumulation and its manifestation in the form of deformation. This strongly affects the formed parameters of the shape accuracy of the treated surfaces and, in some cases, the required tolerance value is not provided. The riveting shows the ratio of increased hardness relative to the initial one and can be used as one of the ways to control the occurrence of possible residual deformations in the surface layers of products. The microstructure of the surface layer is of no small importance, which has a significant impact on the resulting energy consumption during machining, as well as on the possible increase or decrease in the riveting. Conclusions are drawn based on the obtained research results.

Keywords: martensitic steel, grinding, microstructure, bending, tolerance.

For citation: Kolodyazhny D.Yu., Cherkashin S.O., Lyapusov S.G., Voronenko V.P. Ensuring the required shape accuracy of long flat parts made of VNS-2 steel during flat grinding due to variable parameters of cutting modes and heat treatment. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 66–72. (In Russian)

Введение

Для получения заданных параметров качества деталей используются различные технологические методы. В частности, рассматривают явление технологической наследственности [1], то есть анализируются операции, которые предшествовали рассматриваемой. Данный подход является комплексным и учитывает различные параметры, возникающие в ходе технологического процесса изготовления детали. Он остается актуальным и сегодня, а также может применяться для исследования влияния различных параметров, которые требуется контролировать [2]. Один из примеров, это обеспечение заданного параметра качества – точности формы получаемых поверхностей детали, на которую оказывает влияние энергия, расходуемая при механической обработке. Затраты энергии приводят к наклепу в поверхностном слое, который определяется отношением исходного значения твердости к полученному после механической обработки. Перенаклеп может привести к проявлению остаточных деформаций на поверхностных слоях изделия, что часто приводит к неисправимому браку в производстве.

Шлифование характеризуется большим числом факторов, влияющих на требуемый параметр точности. Оборудование играет значимую роль, так как оно должно гарантировать определенный уровень виброустойчивости и жесткости. При обработке важно правильно выбрать характеристики шлифовального круга: структуру, тип связи, ориентацию зерен, их форму и многое другое; так как они влияют на энергозатраты, возникающие при обработке деталей.

Методика проведения исследования

Существует проблема получения требуемой точности формы для длинных плоских деталей из стали ВНС-2 на операции плоского маятникового шли-

фования. После механической обработки за счет остаточных деформаций наблюдается изменение параметра точности, в данном случае – плоскостности, поверхностей деталей и в ряде случаев не обеспечивается требуемая, а именно 0,03 мм.

На остаточные деформации в значительной мере оказывают влияние режимы термообработки. В табл. 1 представлены параметры, которые используются для термической и механической обработок на данный момент на предприятии.

Была поставлена цель снизить величины погрешностей точности формы деталей за счет изменения режимов термической и механических обработок.

Основной критерий, который использовался для контроля – параметр плоскостности. Данный па-

Таблица 1
Используемые режимы резания, термическая обработка и режущий инструмент

Параметр режима резания	Значение
Общий припуск, мм	0,50
Припуск на сторону, мм	0,25
Припуск, снимаемый за один ход, мм	0,0625
Продольная подача, м/мин	25
Скорость круга, м/с	14
Используемый шлифовальный круг	405x75x127x200x50 WA463111VBA5A
Режимы термической обработки:	Закалка: 1000°C±10°C; 30 минут; вода Старение: 500°C±10°C; 150 минут; воздух

Источник: составлено авторами на основании используемых режимов резания в текущем процессе изготовления

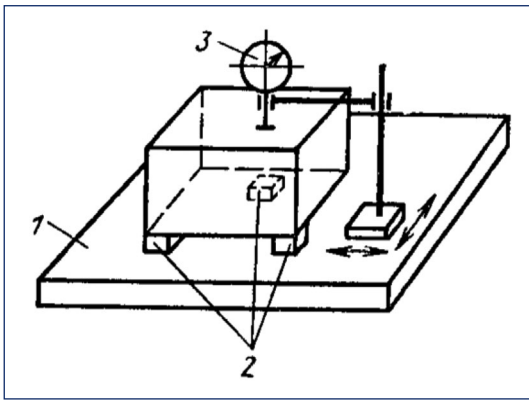


Рис. 1. Схема измерения плоскостности:
1 – поверочная плита (1-1-1000х630 ГОСТ 10905-86);
2 – подкладки (набор концевых мер КМД №1 кл.1 (1-н1) ЧИЗ); 3 – измерительная головка (индикатор Vogel для проверки плоскостей и параллелей) [3]

параметр контролировался по следующей схеме [3], показанной на *рис. 1*.

Эксперименты проводились на образцах из стали марки ВНС-2 (08Х15Н5Д2Т) по ТУ 14-1-2907-2019, которая является труднообрабатываемой, так как содержит большое количество легирующих элементов, таких как: хрома (~15%), никеля (~5%), медь (~2%), титан (~0,2%); и используется в самолетостроении и ракетостроении [4].

Также было решено использовать значение наклепа [5] для анализа появления возможных остаточных деформаций, вызванных разностью твердости поверхностных слоев образцов. Измерения проводились на приборе “Wilson Instruments Rockwell 574” при усилии 150 кгс, на каждом образце были исследованы 15 точек с обеих сторон (*рис. 2*) после термической и механической обработки.

Для получения возможности контроля параметра плоскостности и более полного понимания влияния термической обработки на наклеп, было принято

решение провести дополнительное исследование микроструктуры вышеуказанной стали. Исследование параметров микроструктуры [6] проводилось на микроскопе “ZEISS AX10” и контролировались следующие параметры: балл мартенсита, карбидная сетка, карбидная неоднородность и балл зерна.

План действий по проведению эксперимента состоял из 3 основных этапов [7, 8]:

1. Определение твердости и изучение микроструктуры образцов после подобранных режимов термической обработки.
2. Определение твердости и плоскостности образцов после плоского маятникового шлифования.
3. Расчет наклепа.

Также были изменены режимы резания, которые отображены в *табл. 2*.

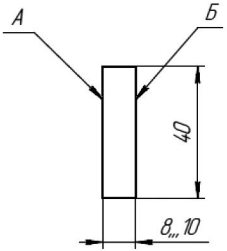
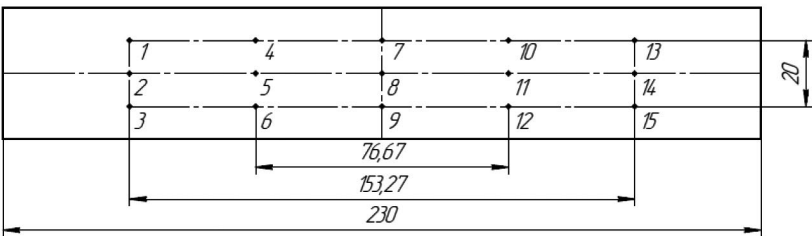
Было решено уменьшить диаметр шлифовального круга для минимизации возникающих вибраций. Уменьшение скорости вращения шлифовального круга обусловлено стремлением снижения интен-

Таблица 2

Режимы резания, режущий инструмент и СОТС

Параметр режима резания	Значение
Общий припуск, мм	1
Припуск на одну сторону, мм	0,5
Припуск за один ход, мм	0,004
Продольная подача, м/мин	8,5
Скорость круга, м/с	5
Используемая СОЖ:	NSK konentrat (водная)
Используемый шлифовальный круг	1A1 250х20х76х10 CBN30 B151 100NV 35

Источник: составлено авторами на основании подобранных режимов резания.



1. Измерения проводить по поверхностям “А” и “Б”.

Рис. 2. Схема для измерения твердости до и после плоского маятникового шлифования
Источник: составлено авторами на основании изготовленных образцов



Рис. 3. Станок плоскошлифовальный 3Е711В [9]

сивности износа. Увеличена глубина резания для возможного исключения предшествующих операций. Уменьшение значения снимаемого слоя за один ход круга требуется для минимизации вносимых тепловых и силовых воздействий.

Станок, на котором проводился эксперимент, представлен на рис. 3 [9].

Для оценки влияния наклепа было решено изменить режимы термической обработки на основании проведенного исследования (табл. 3) [10]. Вид закалки не менялся: был изменен только режим старения. Термическая обработка проводилась в электропечи ПКМ 3.6.2/11,5-ЭК.

Таблица 3

Подобранные режимы термической обработки для образцов из стали 08Х15Н5Д2Т

№ п/п	Режимы для закалки и старения (температура; время выдержки; среда охлаждения)
1	Закалка: 1000°С±10°С; 30 минут; вода / Старение: 200°С±10°С; 150 минут; воздух
2	Закалка: 1000°С±10°С; 30 минут; вода / Старение: 400°С±10°С; 150 минут; воздух
3	Закалка: 1000°С±10°С; 30 минут; вода / Старение: 600°С±10°С; 150 минут; воздух

Источник: составлено авторами на основании проведенного литературного исследования.

Первый этап

Образцы после проведения термической обработки исследовались на твердость и на изменение микроструктуры. Фотографии микроструктуры представлены на рис. 4.

Параметры микроструктуры представлены в табл. 4.



Рис. 4. Фотографии микроструктуры образцов после термической обработки по режимам табл. 3: а) режим № 1; б) режим № 2; в) режим № 3

Источник: составлено авторами на основании полученных фотографий с электронного микроскопа при проведении исследований

Таблица 4

Результаты исследования микроструктуры, полученные на микроскопе ZEISS AX10

№ п/п	Параметр	Значение параметров микроструктуры для образцов		
		Закалка: 1000°С±10°С; 30 минут; вода		
		Старение: 200°С±10°С; 150 минут; воздух	Старение: 400°С±10°С; 150 минут; воздух	Старение: 600°С±10°С; 150 минут; воздух
1	Балл мартенсита	6	-	-
2	Карбидная сетка (балл)	1	2	4
3	Карбидная неоднородность (балл)	1 по шкале Б	4 по шкале А	3 по шкале Б
4	Балл зерна	14	12	11

Источник: составлено авторами на основании проведенного литературного исследования.

Таблица 5

Величины плоскостности образцов из стали ВНС-2

Величины плоскостности образцов			
Закалка: 1000°C±10°C; 30 минут; вода			Требуемая плоскостность, мм
Старение: 200°C±10°C; 150 минут; воздух	Старение: 400°C±10°C; 150 минут; воздух	Старение: 600°C±10°C; 150 минут; воздух	
0,015	0,020	0,025	0,03

Источник: составлено авторами на основании проведенного исследования.

Наихудшие параметры продемонстрировал образец при температуре старения 600°C, а именно карбидная сетка и неоднородность. Наилучшие параметры имеет образец с температурой старения 200°C, а также был определен балл мартенсита, что говорит об отсутствии его у других образцов.

Второй этап

После проведения плоского маятникового шлифования образцы подверглись измерению твердости и плоскостности.

Величины плоскостности образцов представлены в табл. 5.

Требуемая величина плоскостности была соблюдена всеми образцами, но наименьшее значение было у образца при температуре старения 200°C.

Был проведен расчет значений наклепа по формуле (1) [5], и определены значения, представленные в табл. 6.

$$\varepsilon = \frac{HRC - HRC_0}{HRC_0},$$

(1)

где ε – степень упрочнения; HRC – величина твердости после механической обработки; HRC_0 – величина твердости после термической обработки (до механической обработки).

Выводы

При найденных режимах механической и термических обработок был обеспечен заданный параметр точности – плоскостность 0,03 мм.

Таблица 6

Величина наклепа при разных режимах термической обработки

Величина наклепа							
Значение наклепа при текущем режиме обработок	Закалка: 1000°C±10°C; 30 минут; вода						
	Старение: 200°C±10°C; 150 минут; воздух		Старение: 400°C±10°C; 150 минут; воздух		Старение: 600°C±10°C; 150 минут; воздух		
Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б
0,200	0,050	0,140	0,020	0,077	0,025	0,101	0,012

Источник: составлено авторами на основании проведенного исследования.

Исследование наклепа показывает, что присутствует его снижение по сравнению с применяемыми на производстве. Следует сказать о том, что перенаклеп на одной из плоскостей образца может приводить к возможной деформации через неопределенный промежуток времени.

Наилучший параметр плоскостности продемонстрировал образец при температуре старения 200°C, имея лучшие параметры микроструктуры (балла мартенсита, балла зерна, карбидной сетки и карбидной неоднородности). В тоже время образец при температуре старения 400°C имеет наименьший наклеп и, соответственно, меньшую вероятность появления остаточных деформаций.

Приведенный в статье план по проведению эксперимента можно будет использовать в качестве составной части планирования эксперимента по получению количественных взаимосвязей влияния на получаемую точность формы длинных плоских деталей в последующих работах.

Библиографический список

1. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев и др. / Под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.: ил.
2. Яцерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Мн., «Наука и техника», 1977, 256 с.
3. Общетехнический справочник / Под ред. Е.А. Скороходова – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 415 с., ил.
4. ТУ 14-1-2907-2019 Сталь толстолистовая марки 08Х15Н5Д2Т (ЭП410), 08Х15Н5Д2Т-Ш (ЭП-410-Ш). Технические условия.
5. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 356 с.: ил.
6. Атлас микроструктур черных и цветных металлов: учебное наглядное пособие / сост.: А.А. Андрушевич [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2012. – 100 с.
7. Фомин Е.В. Планирование экспериментального исследования обрабатываемости резанием альфа титановых сплавов / Е.В. Фомин, К.К. Снегирева // Вестник МГТУ «Станкин». – 2022. – № 1 (60). – С. 32–36. – EDN: MFUKDD.
8. Темпель О.А. Планирование эксперимента выбора оптимальных параметров процесса резания труднообрабатываемых материалов / О.А. Темпель, Ю.А. Темпель, Д.Е. Васьков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2022. – № 4 (63). – С. 28–31. – EDN: SFOCEM.
9. Универсальный плоскошлифовальный станок 3Е711В: сайт. – URL: <http://stankos.ru/features/shlifovalnye-i-dovodochnye-polirovalnye-i-zatochnye-stanki/3e711v-detail> (дата обращения: 19.11.2024)
10. Внедрение технологичного коррозионно-стойкого материала взамен стали 07Х16Н6 для изготовления рабочих колес центробежных компрессоров / Е.Н. Поморцев, И.Г. Галиахметов, В.И. Чигарин [и др.] // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 5. – С. 44–47.

References

1. Technological heredity in mechanical engineering production / A.M. Dalsky, B.M. Bazrov, A.S. Vasiliev, etc. / Edited by A.M. Dalsky. – M.: Publishing House of MAI, 2000. – 364 p.: ill.
2. Lizarditsyn P.I., Ryzhov E.V., Averchenkov V.I. Technological heredity in mechanical engineering. Mn., “Science and Technology”, 1977, 256 p.
3. General technical reference / Edited by E.A. Skorokhodov. 2nd ed., reprint. And additional. M.: Mechanical Engineering, 1982. 415 p., ill.
4. TU 14-1-2907-2019 Thick-sheet steel grades 08H15N5D2T (EP410), 08H15N5D2T-Sh (EP-410-Sh). Technical conditions.
5. Bezylagny, V.F. The method of similarity in mechanical engineering technology: monograph / V.F. Bezylagny. 2nd ed., ispr. And lop. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2021. 356 p.: ill.
6. Atlas of microstructures of ferrous and non-ferrous metals: an educational visual aid / comp.: A.A. Andrushevich [et al.]. Minsk: BGATU, 2012. 100 p.
7. Fomin, E.V. Planning an experimental study of the machinability of cutting alpha titanium alloys / E.V. Fomin, K.K. Snegireva. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2022. No. 1 (60). P. 32–36. EDN: MFUKDD.
8. Tempel, O.A. Planning an experiment for choosing the optimal parameters of the cutting process of difficult-to-process materials / O.A. Tempel, Yu.A. Tempel, D.E. Vaskov. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2022. No. 4 (63). P. 28–31. EDN: SFOCEM.
9. Universal flat grinding machine 3E711B: website. URL: <http://stankos.ru/features/shlifovalnye-i-dovodochnye-polirovalnye-i-zatochnye-stanki/3e711v-detail> (date of access: 11/19/2024)
10. Introduction of technological corrosion-resistant material instead of steel 07X16H6 for the manufacture of impellers of centrifugal compressors / E.N. Pomortsev, I.G. Galiakhmetov, V.I. Chigarin [et al.]. *Compressor technology and pneumatics*. 2013. No. 5. P. 44–47.

Информация об авторах

Колодяжский Дмитрий Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, проректор по научной деятельности, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
kolod@mail.ru

Черкашин Станислав Олегович – аспирант кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
ct4ccher@yandex.ru

Ляпусов Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, заместитель главного технолога, АО «ММЗ «АВАНГАРД»
lyapusov@yandex.ru

Вороненко Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
vpvoronenko@yandex.ru

Information about the authors

Kolodyazhny Dmitry Yurievich – D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of “Mechanical Engineering Technology”, vice-rector for scientific activities, MSUT “STANKIN”
kolod@mail.ru

Cherkashin Stanislav Olegovich – postgraduate student at the sub-department of “Mechanical Engineering Technology”, MSUT “STANKIN”
ct4ccher@yandex.ru

Lyapusov Sergey Gennadievich – cand. Sc. of Engineering, deputy chief technologist, MMZ AVANGARD JSC
lyapusov@yandex.ru

Voronenko Vladimir Pavlovich – D.Sc. of Engineering, professor at the sub-department of “Mechanical Engineering Technology”, MSUT “STANKIN”
vpvoronenko@yandex.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

УДК 621: 658.511

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 73–82.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 73–82.

А.С. Краско, А.В. Кислова ✉

РТУ МИРЭА

✉ Автор для корреспонденции

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «КОРПУС» ЗА СЧЕТ НОВОГО ПОДХОДА К ПЛАНИРОВКЕ ОБОРУДОВАНИЯ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ И ОПТИМИЗАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТОЯНОК ТРАНСПОРТНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация

В данной работе приведено исследование влияния места стоянки транспортно-загрузочного средства на суммарную длительность транспортных операций в условиях гибких автоматизированных участков при кассетном виде обслуживания.

На основании аналитического определения количества основного технологического оборудования, а также транспортно-загрузочных устройств была разработана планировка оборудования гибкого автоматизированного участка механической обработки деталей типа «корпус». На основании полученного гибкого автоматизированного участка и разработанных технологических процессов механической обработки деталей типа «корпус» была построена имитационная модель (дискретно-событийная модель с применением агентного метода) функционирования гибкого автоматизированного участка в программной среде AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2.

В результате имитационного моделирования функционирования гибкого автоматизированного участка механической обработки деталей типа «корпус» в программной среде AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2 были получены зависимости суммарной длительности транспортных операций от места стоянки транспортно-загрузочного средства. Было определено рациональное место стоянки транспортно-загрузочного средства, что обеспечило сокращение времени выполнения транспортных операций на 57,2 минуты.

На основании представленных результатов были получены аналитические зависимости, позволяющие определить оптимальное место стоянки транспортно-загрузочного средства без применения имитационного моделирования, что позволяет сократить затраты времени на принятие проектно-технологических решений в процессе проектирования гибких автоматизированных участков.

На основании проведенного исследования предложена методика аналитического определения оптимального места стоянки транспортно-загрузочного средства по критерию минимальных затрат времени на транспортные операции. В рассматриваемом примере было достигнуто сокращение времени выполнения транспортных операций еще на 41,5 минуты.

На основании разработанной методики предложен подход к определению оптимальной планировки оборудования участка по критерию минимального суммарного времени транспортных операций.

Ключевые слова: имитационное моделирование, гибкие автоматизированные участки, ГПС, транспортные операции, планировка оборудования, изделие.

Для цитирования: Краско А.С. Кислова А.В. Методы и средства повышения производительности механической обработки деталей типа «корпус» за счет нового подхода к планировке оборудования гибких автоматизированных участков и оптимизации расположения стоянок транспортно-разгрузочных средств // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 73–82.

A.S. Krasko, A.V. Kislova ✉

MIREA – Russian Technological University

✉ Corresponding author

METHODS AND MEANS OF INCREASING THE PRODUCTIVITY OF MACHINING PARTS OF THE “BODY” TYPE DUE TO A NEW APPROACH TO THE LAYOUT OF EQUIPMENT FOR FLEXIBLE AUTOMATED SECTIONS AND OPTIMIZING THE LOCATION OF PARKING FACILITIES

Abstract

This paper presents a study of the influence of the parking location of a transport and loading facility on the total duration of transport operations in flexible automated areas with a cassette type of service.

Based on the analytical determination of the number of main technological equipment, as well as transport and loading devices, the equipment layout of a flexible automated section for machining parts of the “body” type was developed. Based on the obtained flexible automated section and the developed technological processes of mechanical processing of body-type parts, a simulation model (discrete event model using the agent method) of the functioning of a flexible automated section in the AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2 software environment was built.

As a result of simulation modeling of the functioning of a flexible automated section for machining parts of the “body” type in the AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2 software environment, the dependencies of the total duration of transport operations on the parking location of the transport and loading facility were obtained. A rational parking location for the transport and loading facility was determined, which reduced the time required to perform transport operations by 57.2 minutes.

Based on the presented results, analytical dependencies were obtained that make it possible to determine the optimal parking location of a transport and loading facility without using simulation modeling, which reduces the time spent on making design and technological decisions in the process of designing flexible automated sites.

Based on the conducted research, a methodology is proposed for the analytical determination of the optimal parking location of a transport and loading facility according to the criterion of minimum time spent on transport operations. In the example under consideration, a reduction in the execution time of transport operations was achieved by another 41.5 minutes.

Based on the developed methodology, an approach is proposed to determine the optimal layout of the site equipment according to the criterion of the minimum total time of transport operations.

Keywords: simulation modeling, flexible automated sites, GPS, transport operations, equipment layout, product

For citation: Krasko A.S., Kislova A.V. Methods and means of increasing the productivity of machining parts of the “body” type due to a new approach to the layout of equipment for flexible automated sections and optimizing the location of parking facilities. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 73–82. (In Russian)

Введение

Одной из основных тенденцией развития современного машиностроительного производства является повышение производительности выпуска готовых изделий путем создания и внедрения гибких автоматизированных участков (ГАУ), характеризующихся способностью оперативно переналаживаться на выпуск новой продукции [1]. Организующим и объединяющим элементом ГАУ выступает автоматизированная транспортно-склад-

ская система (АТСС), параметры которой оказывают решающее влияние на технико-экономические показатели функционирования всего ГАУ [1-5].

Важным условием уменьшения объемов незавершенного производства, сокращения технологических циклов, а, следовательно, и повышения производительности выпуска изделий является сокращение времени транспортирования изделий, на которое значительное влияние оказывает выбор места стоянки транспортно-загрузочного средства (ТЗС) [6-10].

Необходимая информация для оценки влияния работы АТСС на длительность производственного цикла изделий может быть получена в результате анализа потоков материалов для фиксированных значений параметров ГАУ и заданного распределения деталей по транспортным партиям. При этом обязательно должны рассматриваться динамические закономерности работы проектируемой системы, взаимосвязи её подсистем, процессов обработки и возможности их транспортировки [7]. Все эти вопросы сложны для полного описания и исследования с использованием аналитических методов проектирования. В связи с этим основным инструментом проектирования таких сложных систем, как АТСС ГАУ является имитационное моделирование [8-10].

Для моделирования работы АТСС ГАУ использовались детерминированная, динамическая, дискретно-событийная модель. Построение такой модели представляется возможным в программной среде AnyLogic.

Моделирование алгоритма функционирования ГАУ в среде AnyLogic

С целью определения оптимального расположения места стоянки ТЗС было выполнено имитационное моделирование функционирования ГАУ механической обработки деталей типа «Крышка аксиально-плунжерного насоса». Входными данными для моделирования являются: чертеж детали с указанием размеров всех исполнений, маршрутные технологические процессы изготовления деталей с указанием трудоёмкости обработки для каждой операции, планировка участка, объёмы выпуска деталей ($N_r = 36$ деталей каждого исполнения).

Для изготовления указанных деталей применяются семь групп оборудования: обрабатывающий центр с ЧПУ модели CLX-450 TC; промывочное

оборудование: конвейерная моечная машина АПУ 1000 КТ 1000х1000х5800; оборудование для контроля и маркирования: контрольно-измерительная машина 3Д AZIMUTH и лазерный маркер Wattsan UV TT; оборудование для термической обработки: порталная печь; оборудование для нанесения гальванических покрытий: автоматическая гальваническая линия.

Общее количество станков составляет 8 единиц оборудования, средний коэффициент загрузки 0,873. Станки обслуживаются одним промышленным роботом (ПР), который перемещается по рельсам со скоростью 60 м/мин. Графическая модель ГАУ представлена на *рисунке 1*, на котором также указаны варианты расположения мест стоянки ПР.

В программной среде AnyLogic для моделирования станков используются точечные узлы, и для моделирования порталных машин промывки и оборудования термообработки используется конвейер, чтобы учесть перемещения кассет с деталями в ходе обработки [4].

Заготовки деталей «Крышка 1», «Крышка 2» и «Крышка 3», транспортируются в кассетах в количестве: 6 шт, 4 шт и 2 шт соответственно (*рис. 2*). Для обработки деталей каждого из исполнений используется 6 кассет для изделий «Крышка 1», 9 кассет для изделий «Крышка 2» и 18 кассет для изделий «Крышка 3».

Для промывки детали поступают на мойку в кассетах.

В начале смены ПР заполняет склад, поочерёдно забирая кассеты с заготовками с участка комплектации. После загрузки склада ПР транспортирует кассеты к станкам по ходу технологического процесса. Когда кассета завершает свой производственный цикл, ПР перемещает кассету с готовыми деталями на склад. По окончании обработки всех кассет, загруженных на склад, ПР разгружает склад, перемещая кассеты на участок комплектации.

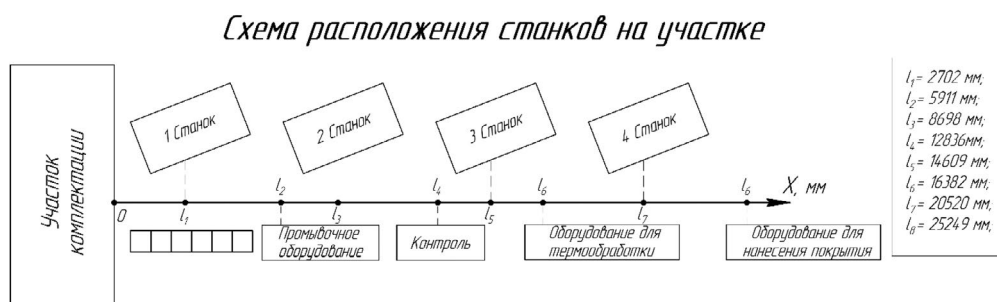


Рис. 1. Графическая модель ГАУ со схемой расположения мест стоянки ТЗС

Разработана авторами на основании аналитического определения числа основного технологического оборудования, приведенного в источнике [5]

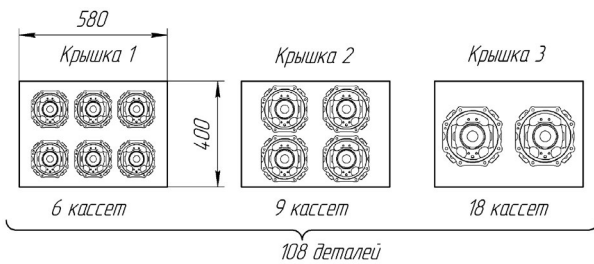


Рис. 2. Расположение деталей в кассете

Разработано авторами на основании габаритных размеров заготовок и кассеты

Исходя из указанного алгоритма функционирования ГАУ разработана дискретно-событийная модель в среде AnyLogic, представленная на рисунке 3.

Моделирование процесса начинается с участка комплектации. Заготовки на участке комплектации устанавливаются в кассеты. Для моделирования работы участка комплектации воспользуемся блоком **Source**, с его помощью создаются кассеты, с установленными заготовками, в указанном месте, в данном случае в ранее созданном прямоугольном узле участка комплектации.

После того как кассеты с заготовками созданы блоком **Source**, ПР забирает их поочерёдно и загружает на склад с заготовками, который представлен в виде стеллажа. Блок, позволяющий провести моделирование данного процесса – **rackStore** [11, 12].

Далее размещаем блок **Delay**, задающий задержку перед следующим действием. Он необходим для проверки корректности выполнения предыдущей операции перед началом следующей, а также для корректной работы программы.

Далее для определения производственного цикла обработки кассет необходимо ввести блок **timeMeasureStart**, который выступает началом отсчёта времени обработки деталей [4].

Так как на ГАУ механической обработке подвергается три вида деталей, установленных соответственно в три вида кассет, то необходимо провести

моделирование пути каждой из видов кассет. Для этого в логическую цепочку необходимо добавить блок **SelectOutput5** [6].

Моделирование технологического процесса обработки осуществлялось с помощью использования блоков **MoveByTransporter**, которые имитируют передвижение ТЗС [13]. Так как в кассете первого типа находится 6 деталей, то проведём моделирование, согласно которому ПР перемещает кассету с заготовками на станок, устанавливает первую деталь из кассеты, после чего отправляется на место стоянки ожидать окончания обработки первой детали из кассеты. По окончании обработки, ТЗС перемещается к станку и задерживается там на время, необходимое для снятия обработанной заготовки и установки следующей.

Для моделирования обработки на станке используется блок **Service**. В его свойствах указывается набор ресурсов, с помощью которых выполняется операция, их количество, а также указывается время задержки, которое будет соответствовать времени обработки детали на данном станке.

Для моделирования обработки деталей на портальных машинах, где детали поступают на операцию в кассетах и производится обработка деталей также в кассетах, использован блок **Convey**, для которого необходимо задать начальный конвейер, смещение от начала, конечный конвейер и конечное смещение. Время обработки детали на конвейере регламентируется скоростью движения конвейера в свойствах самого конвейера [14].

Также для моделирования необходимо использовать элементы **RestrictedAreaStart** и **RestrictedAreaEnd**. Первый указывает на то, что после этого элемента в логике процесса может находиться заданное число агентов. Данный элемент работает в паре со вторым, при этом второй должен иметь в паре только один элемент **RestrictedAreaStart** [15].

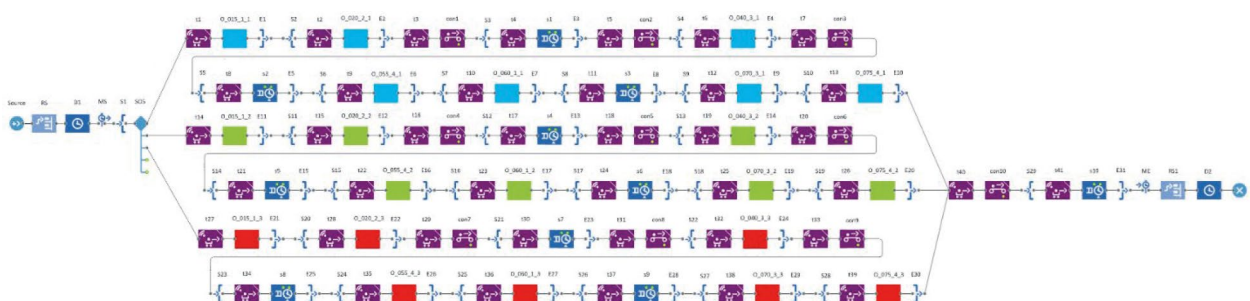


Рис. 3. Дискретно-событийная модель функционирования ГАУ

Разработана авторами на основании предложенного алгоритма функционирования ГАУ и методики, приведенной в источнике [4]

Далее для определения производственного цикла обработки необходимо вынести блок **timeMeasureEnd**, который выступает окончанием отсчёта времени обработки деталей.

По завершении технологического процесса ТЗС загружает кассеты с обработанными деталями обратно на стеллаж (аналогично **rackStore**), после чего моделирование заканчивается блоком **Delay** с временем задержки 1 год с последующим блоком **sink**, который уничтожает агенты [15–17].

Анализ полученных результатов и разработка рекомендаций по выбору места стоянки ТЗС

В процессе выполнения имитационного эксперимента исследовалась зависимость суммарного времени выполнения транспортных операций от места стоянки ТЗС.

Место стоянки ТЗС представлен как определённый участок, находящийся на транспортном пути, предназначенный для размещения ТЗС в пределах отведённой площади, в том случае, если ТЗС не занято (т.е. не выполняет функцию транспортирования).

Для проведения эксперимента установлены восемь вариантов мест стоянки ТЗС, находящихся на минимальном расстоянии от каждого из оборудования. Введём систему координат ОХ, за начало которой примем точку отсчёта на границе участка комплектации (см. рис. 1).

Имитационный эксперимент повторялся восемь раз с изменением места стоянки ТЗС. По результатам моделирования были получены данные для-

тельности обработки всех деталей, пройденного пути ТЗС и времени обработки каждой кассеты с заготовками.

Для выявления зависимости расположения места стоянки ТЗС от длительности производственного цикла согласно результатам имитационного моделирования, был получен график зависимости времени от расстояния, пройденного ТЗС (рис. 4).

Из графика на рисунке 4 видно, что при расположении места стоянки ТЗС у оборудования нанесения покрытия производственный цикл изготовления изделий принимает наибольшее значение. В то же время, при расположении места стоянки около 2-го станка даёт наилучшие результаты по трудоёмкости изготовления всей партии деталей.

По результатам моделирования составим список мест стоянки ТЗС по трудоёмкости изготовления деталей от меньшего значения к большему:

1. Стоянка около 2 станка – 2095,653 мин;
2. Стоянка около промывочного оборудования – 2128,476 мин;
3. Стоянка около контрольного оборудования – 2128,503 мин;
4. Стоянка около 3 станка – 2129,85 мин;
5. Стоянка около оборудования термообработки – 2129,92 мин;
6. Стоянка около 1 станка – 2134,814 мин;
7. Стоянка около 4 станка – 2144,575 мин;
8. Стоянка около оборудования покрытия – 2152,858 мин.

Так как имитационное моделирование занимает значительное время при проектировании ГАУ, следует получить аналитическое решение задачи опре-

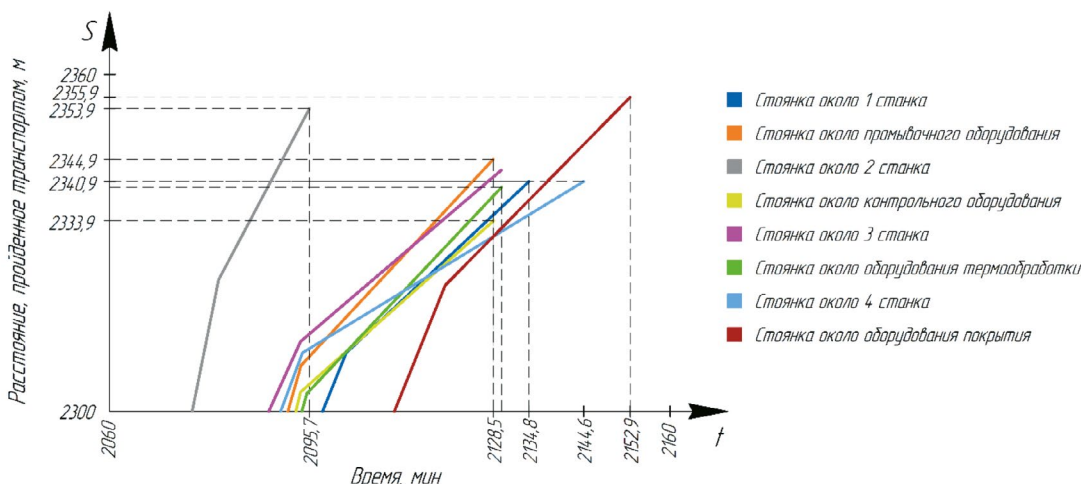


Рис. 4. Расстояние, пройденное ТЗС в зависимости от выбранного места стоянки

Графики построены на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

деления оптимального места стоянки ТЗС на основании результатов проведенного моделирования.

При работе ТЗС в ГАУ наибольшей загруженностью обладают места стоянки рядом с тем оборудованием, заявки на которые поступают чаще остальных. Поэтому целесообразно ввести коэффициент интенсивности поступления заявок на i -е рабочее место. Интенсивность поступления заявок зависит от числа заявок, выдаваемых оборудованием, а также от среднего штучного времени обработки заготовки на данном оборудовании:

$$k_i = \frac{n_i}{T_{шт.ср.i}}, \quad (1)$$

где n_i – число заявок для i -го рабочего места; $T_{шт.ср.i}$ – среднее штучное время обработки заготовки на i -ом рабочем месте.

Для определения числа заявок, поступающих на транспортировку, определены следующие зависимости:

- при обработке заготовок по одной штучке:

$$n = c \cdot \sum (n_{кас.j} \cdot (n_{дет.j} + 1)), \quad (2)$$

где $n_{дет.j}$ – число деталей в j -й кассете; $n_{кас.j}$ – число кассет j -го типа; c – количество операций в ТП, выполняемых на станке;

- при параллельной обработке всех деталей в кассете (промывка):

$$n = 2n_{кас} \cdot c, \quad (3)$$

где $n_{кас}$ – число кассет; c – количество операций в ТП, выполняемых на станке.

Расчет коэффициентов интенсивности поступления заявок представлен в виде *таблицы 1*.

Оборудование с наибольшим коэффициентом интенсивности поступления заявок будет чаще остальных вызывать ТЗС, поэтому целесообразней располагать место стоянки транспорта рядом с ним. Но так как мы рассматриваем работу всего участка, то необходимо учитывать коэффициент интенсивности каждого из станков, таким образом, необходимо определить место стоянки, которое будет являться суперпозицией для всего оборудования.

Тогда для определения оптимального места расположения стоянки ТЗС используем следующую формулу:

$$P = \sum k_i \cdot (|l_i - l_{см}|) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где P – коэффициент транспортной загруженности; k_i – коэффициент интенсивности поступления заявок от i -ого рабочего места; l_i – расстояние от начала отсчета до i -ого рабочего места; $l_{см}$ – расстояние от начала отсчета до места стоянки.

Результаты расчета коэффициента транспортной загруженности представлены в *таблице 2*.

Исходя из данных, представленных в *таблице 2*, можно сделать вывод о том, что результаты аналитического расчета совпадают с результатами имитационного эксперимента. Следовательно, представленный критерий определения места стоянки ТЗС справедлив для поиска оптимального места расположения с целью минимизации производственного цикла изготовления изделий.

Таблица 1

Коэффициенты интенсивности поступления заявок

Оборудование	$T_{шт.ср.}$, мин	N_z , шт.	$n_{кас}$, шт.	c , шт.	n , заявок	k
1 станок	6,35	108	33	2	282	1,23
Промывочное оборудование	1,76	108	33	3	198	3,13
2 Станок	12,93	108	33	1	141	0,30
Контрольное оборудование	3,87	108	33	3	198	1,42
3 Станок	6,12	108	33	2	282	1,28
Оборудование для термообработки	12,50	108	33	1	66	0,15
4 Станок	6,18	108	33	2	282	1,27
Оборудование для покрытия	12,50	108	33	1	66	0,15

Таблица составлена на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

Таблица 2

Результаты расчета коэффициент транспортной загруженности

Оборудование	1 Станок	Промывочное оборудование	2 Станок	Контрольное оборудование	3 Станок	Оборудование термообработки	4 Станок	Оборудование покрытия	Р
<i>k</i>	1,23	3,13	0,30	1,42	1,28	0,15	1,27	0,15	-
Расстояние до									
1 станка, м	0	3,21	5,99	10,13	11,91	13,68	17,82	22,55	69,42
промывочного оборудования, м	3,21	0	2,78	6,93	8,69	10,47	14,61	19,34	48,69
2 станка, м	5,99	2,79	0	4,14	5,91	7,68	11,82	16,55	48,11
контрольного оборудования, м	10,13	6,93	4,14	0	1,77	3,55	7,68	12,41	49,75
3 станка, м	11,91	8,69	5,91	1,77	0	1,77	5,91	10,64	55,50
оборудования термообработки, м	13,68	10,47	7,68	3,55	1,77	0	4,14	8,87	65,79
4 станка, м	17,818	14,61	11,82	7,68	5,91	4,14	0	4,73	91,01
оборудования покрытия, м	22,55	19,34	16,55	12,41	10,64	8,87	4,73	0	131,84

Таблица составлена на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

Исходя из полученных выводов, можно составить алгоритм действий для определения оптимального места расположения стоянки ТЗС для ГАУ при кассетном виде обслуживания (рис. 5).

Оптимизация планировки ГАУ с учетом коэффициента транспортной загруженности

В том случае, если выбор оптимального места стоянки ТЗС производится на этапе разработки компоновочно-планировочных решений ГАУ, то возможно определить расположение оборудования с целью повышения производительности выпуска готовых изделий за счёт сокращения времени на транспортировку.

Так как место стоянки ТЗС необходимо выбирать рядом с тем оборудованием, которое обладает наибольшим коэффициентом интенсивности поступления заявок на транспортировку, то место стоянки будет находиться рядом с промывочным оборудованием ($k = 3,125$). Далее с правой и с левой стороны целесообразно расположить оборудование, коэффициенты интенсивности поступления заявок, на которые будет меньше, чем на промывочное оборудование, но больше, чем на все остальные рабочие места. Таким образом рядом с промывочным оборудованием располагается контрольное оборудование ($k = 1,422$) и 3-й станок ($k = 1,281$).

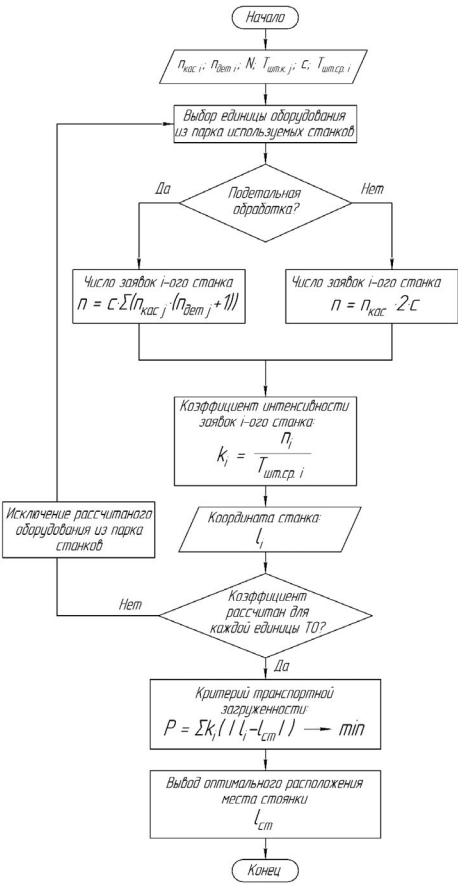


Рис. 5. Алгоритм определения оптимального расположения места стоянки ТЗС
Алгоритм составлен авторами на основе данных, полученных в результате формализации методики определения оптимального расположения места стоянки ТЗС

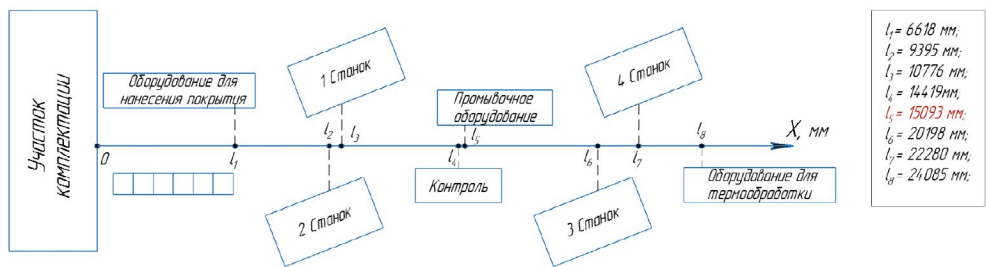


Рис. 6. Оптимизированная планировка расположения оборудования на участке
Планировка разработана на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

По описанному принципу изменим планировку оборудования, представленную на рисунке 1 (рис. 6). Для измененной планировки определим коэффициент транспортной загруженности:

$$P = 0,147 \cdot (|6618 - 15093|) + 0,303 (|9395 - 15093|) + 1,234 (|10776 - 15093|) + \\ + 1,422 \cdot (|14419 - 15093|) + 3,125 \cdot (|15093 - 15093|) + 1,281 \cdot (|20198 - 15093|) + \\ + 1,269 \cdot (|22280 - 15093|) + 0,147 \cdot (|24085 - 15093|) = 26239,56 \frac{\text{мм} \times \text{шт}}{\text{мин}}$$

Для сравнения результатов до и после проведения перепланировки было проведено имитационное моделирование и построены графики, представленные на рисунке 7.

Как видно из полученных данных, измененная планировка оборудования позволяет сократить время на транспортировку изделий на 41,5 минут за весь период моделирования.

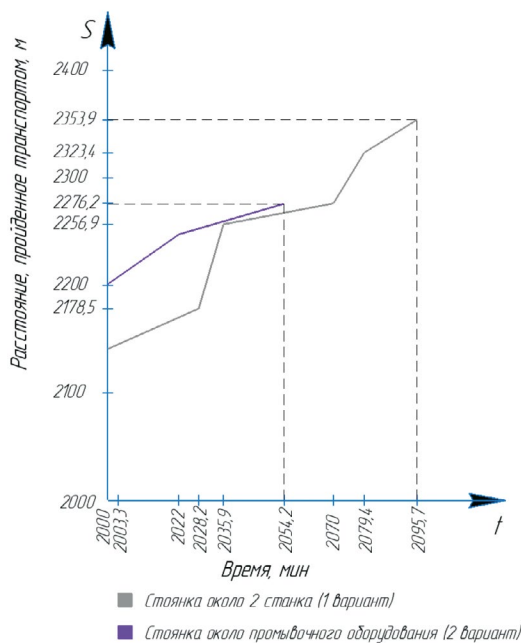


Рис. 7. Графики суммарного перемещения ТЗС в зависимости от места стоянки
Графики построены на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

Заключение

Полученная методика определения оптимального места стоянки ТЗС позволяет получить проектное решение ГАУ с минимальным суммарным временем выполнения транспортных операций, что повышает производительность выпуска готовых изделий. В частности, при оптимизации расположения оборудования на рассматриваемом участке было достигнуто сокращение времени транспортных операций на 41,5 минут.

Помимо этого, применение методики позволяет избежать значительных потерь времени на имитационное моделирование функционирования ГАУ.

Использование коэффициента транспортной загруженности позволяет решить задачу оптимизации планировки рабочих места, в частности, технологического оборудования по критерию минимальной суммарной мощности грузопотоков на ГАУ.

Библиографический список

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 8 [Текст]: учебник / Ю.Г. Карпов. – Санкт-Петербург, 2017. – 400 с.
2. Киселева М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебное пособие. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. – 88 с.
3. Олейникова С.А. Моделирование: учебное пособие / С.А. Олейникова; ФГБОУ «Воронежский

государственный технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. – 127 с.

4. Ковалев А.А., Краско А.С., Зуев В.В. Имитационное моделирование работы технологического комплекса в программной среде AnyLogic: Учебное пособие / А.А. Ковалев, А.С. Краско, В.В. Зуев. – М.: Издательство «Спутник+», 2021. – 157 с.

5. Шишмарёв В. Ю. Организация и планирование автоматизированных производств: учебник для среднего профессионального образования / В.Ю. Шишмарёв. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2025. – 318 с.

6. Koulinas, G.K., Paraschos, P.D. & Koulouriotis, D.E. A machine-learning framework for explainable knowledge mining and production, maintenance, and quality control optimization in flexible circular manufacturing systems. *Flex Serv Manuf J* 36, 737–759 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09537-x>

7. Боев В.Д. Компьютерное моделирование систем: учебное пособие для среднего профессионального образования. – М.: Юрайт, 2019. – 253.

8. Албагачиев А.Ю., Краско А.С. Модель загрузки транспортно-загрузочного средства гибкой производственной системы // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2019. – № 4. – с.77-88.

9. Филин М.А., Краско А.С. Определение оптимальных параметров обслуживания заготовок при имитационном моделировании автоматизированных технологических комплексов // Главный механик. 2022. – Том 19. – № 5. – С. 321–331.

10. Евтюхина В.В. Организационные резервы сокращения длительности производственного цикла на основе реализации принципов «Бережливого производства» на отечественных предприятиях // ЭКОНОМИНФО. – 2008. – № 9.

11. Антонова И.И. Бережливое производство: системный подход к его внедрению на предприятиях Республики Татарстан / И.И. Антонова; Институт экономики, управления и права (г. Казань). – Казань: Познание (Институт ЭУП), 2013. – 176 с. Хватов Б.Н. Гибкие производственные системы. Расчёт и проектирование // Издательство ТГТУ, 2007.

12. Fang W., Huang Jx., Peng Tx. et al. Machine learning-based performance predictions for steels considering manufacturing process parameters: a review. *J. Iron Steel Res. Int.* 31, 1555–1581 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01179-5>

13. Андык В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на ТЭС: учебник для среднего профессионального образования / В. С. Андык. – М.: Юрайт, 2025. – 407 с.

14. Клочков Ю.П. Организация бережливого производства на предприятиях машиностроения: диссертация кандидата экономических наук: 08.00.05. – Ижевск, 2012. – 179 с.

15. Бородин И.Ф. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления: учебник для среднего профессионального образования / И. Ф. Бородин, С. А. Андреев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2025. – 377 с.

16. Soufi Z., Mestiri S., David P. et al. A material handling system modeling framework: a data-driven approach for the generation of discrete-event simulation models. *Flex Serv Manuf J* (2024). <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09535-z>

17. Рачков М.Ю. Автоматизация производства: учебник для среднего профессионального образования / М. Ю. Рачков. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2025. – 182 с.

References

1. Karpov Yu.G. Simulation modeling of systems. Introduction to modeling with AnyLogic 8 [Text]: textbook / Yu.G. Karpov. – St. Petersburg, 2017. – 400 p.

2. Kiseleva M. V. Simulation modeling of systems in the AnyLogic environment: a textbook. – Yekaterinburg: UGTU – UPI, 2009. – 88 p.

3. Oleynikova S.A. Modeling: a textbook / S.A. Oleynikova; Voronezh State Technical University. – Voronezh: VSTU Publishing House, 2020. – 127 p.

4. Kovalev A.A., Krasko A.S., Zuev V.V. Simulation modeling of the technological complex in the AnyLogic software environment: Textbook/ A.A. Kovalev, A.S. Krasko, V.V. Zuev. – М.: Sputnik+ Publishing House, 2021. – 157 p.

5. Shishmarev, V. Y. Organization and planning of automated production facilities: a textbook for secondary vocational education / V. Y. Shishmarev. – 2nd ed. – Moscow: Yurait Publishing House, 2025. – 318 p.

6. Koulinas, G.K., Paraschos, P.D. & Koulouriotis, D.E. A machine learning framework for explainable knowledge mining and production, maintenance, and quality control optimization in flexible circular manufacturing systems. *Flex Serv Manuf J* 36, 737–759 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09537-x>

7. Boev V.D. Computer modeling of systems: a textbook for secondary vocational education. – М.: Yurayt Publishing House, 2019. – 253.

8. Albagachiev A.Yu., Krasko A.S. Loading model of a transport and loading means of a flexible production system. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2019. No.4. P. 77–88.

9. Filin M.A., Krasko A.S. Determination of optimal parameters for the maintenance of workpieces in the simulation of automated technological complexes. *Chief Mechanic*. Vol. 19. No. 5. 2022, p. 321–331.
10. Evtyukhina V.V. Organizational reserves for reducing the duration of the production cycle based on the implementation of the principles of “Lean production” at domestic enterprises. *ECONOMINFO*. No. 9. 2008.
11. Antonova I.I. Lean production: a systematic approach to its implementation at enterprises of the Republic of Tatarstan / I I. Antonova; scientific ed. V.A. Smirnov; Institute of Economics, Management and Law (Kazan). Kazan: Cognition (EUP Institute), 2013. 176 p. Khvatov B.N. Flexible production systems. Calculation and design// TSTU Publishing House, 2007.
12. Fang, W., Huang, Jx., Peng, Tx. et al. Machine learning-based performance predictions for steels considering manufacturing process parameters: a review. *J. Iron Steel Res. Int.* 31, 1555–1581 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01179-5>
13. Andyk, V.S. Automated process control systems at thermal power plants: a textbook for secondary vocational education / V.S. Andyk. Moscow: Yurait Publishing House, 2025. 407 p.
14. Klochkov Yu.P. Organization of lean production at machine-building enterprises: dissertation of Candidate of Economic Sciences: 08.00.05. Izhevsk, 2012, 179 p.
15. Borodin I.F. Automation of technological processes and automatic control systems: a textbook for secondary vocational education / I.F. Borodin, S.A. Andreev. 2nd ed., ispr. and add. Moscow: Yurait Publishing House, 2025. 377 p.
16. Soufi Z., Mestiri S., David P. et al. A material handling system modeling framework: a data-driven approach for the generation of discrete-event simulation models. *Flex Serv Manuf J* (2024). <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09535-z>
17. Rachkov M. Y. Automation of production: textbook for secondary vocational education / M.Y. Rachkov. 2nd ed., ispr. and add. Moscow: Yurait Publishing House, 2025. 182 p..

Информация об авторах

Краско Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
krasko_as@mail.ru

Кислова Анастасия Владимировна – преподаватель кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
kislova@mirea.ru

Information about the authors

Krasko Alexander Sergeevich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
krasko_as@mail.ru

Kislova Anastasia Vladimirovna – lecturer at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
kislova@mirea.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

УДК 621.777.24

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 83–92.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 83–92.

А.М. Дмитриев, Н.В. Коробова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СИЛЫ ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ЗАГОТОВОК ОТ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ СТУПЕНЧАТОГО ПУАНСОНА

Аннотация

Получена формула для определения силы холодной объемной штамповки выдавливанием детали типа стакана со ступенчатой полостью. Формула получена путем проведения экспериментального исследования по плану, являющемуся развитием метода греко-латинских квадратов, а также применения описанного в статье способа обработки результатов исследования. Выдавливание осуществлялось за один переход пуансоном, у которого рабочая часть имела ступенчатую форму с галтелью под ступенью. Полученная формула позволяет определять силу выдавливания пуансоном в зависимости от формы и размеров его рабочей части. Для расширения области применения полученной формулы для расчета сил холодного выдавливания деталей из разных материалов, имеющих различную форму полости, силы выдавливания, зависящие также от характеристик упрочнения материала заготовки, и исследуемые размеры ступенчатого пуансона рассмотрены и учтены в полученной формуле в относительных величинах. Проведена проверка результатов определения силы выдавливания ступенчатым пуансоном путем экстраполирования полученной формулы на форму гладкого (не имеющего ступеней) пуансона. Проверка показала достоверность полученной формулы.

Ключевые слова: детали со ступенчатой полостью, выдавливание холодное, величина деформирующей силы, определение экспериментальное, планирование и обработка результатов эксперимента.

Для цитирования: Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Исследование зависимости силы обратного выдавливания заготовок от относительных размеров ступенчатого пуансона // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 83–92.

A.M. Dmitriev, N.V. Korobova

MSUT “STANKIN”

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF THE FORCE OF REVERSE EXTRUSION OF WORKPIECES ON THE RELATIVE DIMENSIONS OF A STEPPED PUNCH

Abstract

The formula has been obtained for determining the force of cold volumetric stamping by extrusion of a glass-type part with a stepped cavity. The formula was obtained by conducting an experimental study according to the plan, which is the development of the method of Greek-Latin squares, as well as using the method of processing the research results described in the article. Extrusion was carried out in one transition with a punch, in which the working part has a stepped shape with a gatel under the step. The formula makes it possible to determine the extrusion force of a punch depending on the shape and size of the working part. To expand the scope of the obtained formula for calculating the cold extrusion forces of parts made of different materials having different cavity shapes, the extrusion forces, which also depend on the hardening characteristics of the workpiece material, and the dimensions of the stepped punch under study are considered and taken into account in the obtained formula in relative terms. The results of determining the extrusion force with a stepped punch have been verified by extrapolating the obtained formula to the shape of a smooth (stepless) punch. The verification showed the validity of the formula obtained.

Keywords: parts with a stepped cavity, cold extrusion, magnitude of the deforming force, experimental determination, planning and processing of experimental results.

For citation: Dmitriev A.M., Korobova N.V. Investigation of the dependence of the force of reverse extrusion of workpieces on the relative dimensions of a stepped punch. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 83–92. (In Russian)

Введение

Область применения прогрессивной технологии холодного обратного выдавливания полых деталей из сплошных цилиндрических заготовок ограничена большой величиной удельной силы (усредненной величины осевого напряжения), которую необходимо создавать на рабочем торце выдавливающего полость пуансона [1]. При штамповке детали со ступенчатой полостью возможным вариантом технологического процесса является выдавливание отдельных участков полости пуансонами соответствующих диаметров, так называемыми гладкими пуансонами, поскольку их рабочая часть не имеет ступеней. При холодном выдавливании гладкими пуансонами величина удельной силы 2500 МПа считается предельно допустимой с позиций рациональности процесса для пуансонов, изготовленных из быстрорежущих сталей: P9, P18, P6M. Для пуансонов из сталей X12Ф1, X12M предельно допустимой с позиций рациональности процесса удельной силой считается ее величина 2200 МПа [2].

Штамповка выдавливанием полости в заготовке показанным на *рис. 1* ступенчатым пуансоном, по сравнению с выдавливанием каждого участка полости гладким пуансоном, имеет не только преимущества в обеспечении строгой соосности между собой участков полости и в сокращении количества штамповочных операций, но и недостаток. Недостаток заключается в увеличении удельной силы выдавливания, что связано с изменениями направления течения выдавливаемого металла заготовки и взаимным влиянием потоков металла из-под торца пуансона вверх и от торца ступени вниз. Напомним, что удельная сила [1] определяется как частное от деления деформирующей заготовку силы на площадь поперечного сечения пуансона на уровне его калибрующего выдавливаемую полость детали пояска. Помимо увеличенной деформирующей силы, ступенчатый пуансон испытывает двойную концентрацию напряжений: силовую – на участке между торцом пуансона и торцом ступени, и геометрическую – в галтели под ступенью. Наибольшей величины напряжения в ступенчатом пуансоне достигают в галтели под его ступенью [3].

Именно в этой области начинается усталостное разрушение ступенчатого пуансона. Вследствие сказанного, сопротивление ступенчатого пуансона усталостному разрушению существенно ниже, чем у гладких пуансонов, выдавливающих отдельные участки полости при указанном выше альтернативном технологическом процессе. В результате сужается область материалов, заготовки из которых можно выдавливать ступенчатыми пуансонами при обеспечении достаточно высокого сопротивления усталости таких пуансонов.

В работах авторов настоящей статьи [3, 4] опубликованы результаты проведенных исследований макроструктур деталей, полости в которых изготовлены выдавливанием ступенчатыми пуансонами, также теоретического анализа распределения напряжений в выдавливаемых ступенчатыми пуансонами заготовках и в самих пуансонах.

Целью исследования, описанного в настоящей статье, является получение формулы, применимой для расчетов сил холодного выдавливания ступенчатыми пуансонами с разными размерами деталей из разных материалов. Для достижения указанной цели определенные экспериментальным путем величины удельных сил выдавливания, имевшие размерность в МПа, переводили в относительные величины путем деления на напряжение текучести материала заготовки, также измеренное в МПа, для которого величина конкретной удельной силы была определена. Полученная таким образом величина позволяет определять безразмерную относительную удельную силу выдавливания. Для определения удельной силы выдавливания заданной чертежом конкретной детали рассчитанную по полученной формуле величину относительной удельной силы умножают на напряжение текучести материала, из которого изготавливают деталь. Затем рассчитывают силу выдавливания, умножая удельную силу на площадь поперечного сечения калибрующего пояса пуансона, которым будет производиться выдавливание заданной чертежом детали.

На основании предшествующего опыта, отраженного в статьях [3, 4], в описанном ниже исследовании принято, что сила обратного выдавливания заготовки ступенчатым пуансоном зависит от четырех факторов: относительного радиуса матрицы R , относительного радиуса ступени пуансона r_1 , относительного радиуса галтели r_2 , относительной длины участка пуансона до ступени l (рис. 1). В проведенном эксперименте диаметр матрицы равнялся 20 мм. В ней штамповали заготовки, также имевшие диаметр 20 мм, с высотой 25 мм. Заготовка в матри-

це опиралась на нижний пуансон, и матрица была освобождена от крепления вдоль своей оси. Под действием напряжений трения на контакте с заготовкой матрица поднималась вслед за вытекающим из-под пуансона деформируемым сплавом. Это позволило уменьшить силу выдавливания.

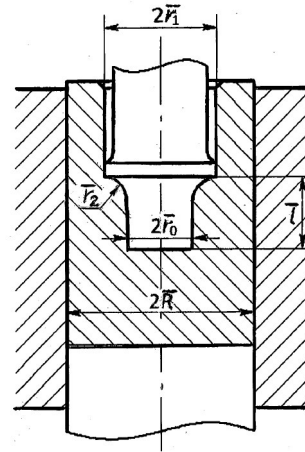


Рис. 1. Принятые обозначения относительных размеров ступенчатого пуансона:

$$R = \frac{\bar{R}}{\bar{r}_0}; r_1 = \frac{\bar{r}_1}{\bar{r}_0}; r_2 = \frac{\bar{r}_2}{\bar{r}_0}; l = \frac{\bar{l}}{\bar{r}_0}$$

На рис. 1 и в подрисуночной подписи буквами с чертой сверху обозначены натуральные, т.е. измеренные в мм, размеры пуансона. Эти натуральные размеры переведены в относительные путем их деления на измеренный в мм радиус торца пуансона. Сделано это для того, чтобы полученная в результате описанного в настоящей статье исследования формула была применима для расчетов сил штамповки холодным выдавливанием вне зависимости от габаритов деталей.

Исследуемая удельная сила выдавливания заготовок q определялась путем деления измеренной в опытах силы выдавливания P , на площадь торца ступени пуансона $\pi \bar{r}_1^2$. Деформирование заготовок проводили на гидравлической испытательной машине марки Инстрон. Технологическим смазочным материалом служил технический животный жир. Каждый из опытов был проведен дважды: на заготовках из алюминиевого сплава Д1 и заготовках из меди М1 [5]. Скорость деформирования заготовок составляла 5 мм/мин. Выдавливание заготовок из двух разных материалов было проведено, чтобы повысить универсальность формулы, полученной в результате описанного в настоящей статье исследования.

Напряжения текучести материалов деформируемых в эксперименте заготовок определяли по кривым упрочнения, построенным по результатам испытания образцов на сжатие. Заготовки для испытания вырезали из прутков в состоянии их поставки, без дополнительной термообработки. Для построения кривой упрочнения для меди М1 проводили поэтапную осадку двух цилиндрических образцов диаметром 15 мм и высотой 16 и 18 мм. Перед каждым этапом осадки на торцы заготовок наносили смазочный материал, что позволило практически полностью исключить образование бочки у осаживаемой заготовки, т.е. свести к минимуму влияние трения между заготовкой и шлифованными бойками, на которых производилась осадка. Для построения кривой упрочнения для сплава Д1 при изготовлении образцов для испытания на их торцах вытачивали канавки. Диаметр канавок был на 1 мм меньше диаметра образца. Глубина канавок составляла 0,5 мм. Канавки заполняли техническим животным жиром. В результате разделительный слой смазочного материала между торцами образцов и бойками, на которых производили осадку, сохранялся в течение длительного этапа деформирования образца. Такое различие в подготовке образцов из меди и алюминиевого сплава для испытания на осадку вызвано тем, что коэффициент контактного трения между поверхностью шлифованного стального бойка и поверхностью медного образца существенно меньше коэффициента контактного трения между поверхностью шлифованного стального бойка и поверхностью алюминиевого образца.

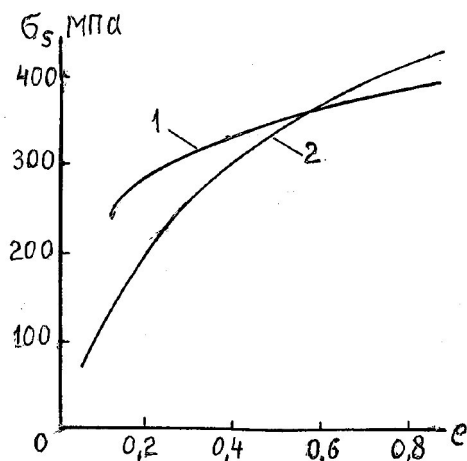


Рис. 2. Кривые упрочнения при сжатии алюминиевого сплава Д1 – 1 и меди М1 – 2

Степень деформации осаживаемого образца e , откладываемая по горизонтальной оси при построении графика на рис. 2, оценивали как отношение приращения площади поперечного сечения образца к самой указанной площади. Приращение площади поперечного сечения рассчитывали через неизменный объем образца и фиксируемое записывающим устройством испытательной машины уменьшение высоты образца.

Методика строгого определения степени деформации при выдавливании деталей типа стаканов описана в работе [1]. Приближенная оценка величины степени деформации при выдавливании стаканов как гладким, так и ступенчатым пуансонами, проведена по следующей формуле:

$$e = [F_{заг} - (F_{заг} - F_{пол})] / F_{заг} = d^2 / D^2, \quad (1)$$

где $F_{заг}$ – площадь поперечного сечения заготовки, $F_{пол}$ – площадь поперечного сечения выдавленной полости стакана, D – внешний диаметр стакана, равный диаметру заготовки, d – внутренний диаметр стакана. Для определения степени деформации при выдавливании ступенчатым пуансоном вместо величины d в формулу (1) следует подставлять $2\bar{r}_1$ (рис. 1).

Основная часть

При проведении описываемого исследования каждому из четырех указанных в подписи к рис. 1 факторов в эксперименте придавали 5 различных значений. При традиционном (так называемом однофакторном) экспериментировании варьируемый фактор принимал бы 5 различных значений при неизменных значениях остальных трех факторов. После этого меняли бы значение одного из трех зафиксированных факторов и снова придали 5 различных значений варьируемому фактору. После исследования влияния ранее варьируемого фактора его перевели бы на место зафиксированного. Затем варьировали бы другой из ранее зафиксированных факторов. При таком экспериментировании число опытов составляет 625.

При принятом в настоящей статье плане эксперимента в виде представленного на рис. 3 комбинационного квадрата, где малыми клетками отмечены исследованные сочетания факторов, количество опытов (и соответственно комплектов инструмента) сокращается в 25 раз. Применение таких комбинационных квадратов является предложенным М.М. Протодяконовым и Р.И. Тедером развитием метода греко-латинских квадратов, опубликованным в доступной в Интернете книге этих авторов.

Форма графика изменения силы по ходу выдавливания заготовки представлена на *рис. 4*. На этом графике для сопоставления результатов разных опытов за силу выдавливания ступенчатым пуансоном было принято значение, соответствующее началу внедрения в заготовку его ступени и отмеченное на *рис. 4* кружком. Считали, что дальнейший рост силы вызван упрочнением металла заготовки. Таким образом, при выдавливании заготовок из упрочняющихся сплавов, полученная путем описываемого эксперимента формула дает правильный результат при небольшой глубине полости на ее

участке выше ступени. При выдавливании заготовок из не упрочняющихся сплавов формула применима при любой глубине полости.

Экспериментально определенные величины удельных сил выдавливания q приведены на *рис. 5* на графиках вверху для каждой из отмеченных буквами позиций. На этом же рисунке, на графиках внизу, приведены значения относительных удельных сил выдавливания q/σ_s . Величины напряжения текучести σ_s были определены по кривым упрочнения материалов заготовок, приведенным на *рис. 2*.

R	r ₁	1,1				1,2				1,3				1,4				1,5			
		0,8	1,2	1,6	2	0,8	1,2	1,6	2	0,8	1,2	1,6	2	0,8	1,2	1,6	2	0,8	1,2	1,6	2
1,7	0,8																				
	1,2	4,12				3,7	3,72			4,06				3,6	3,49			4,38			
	1,6		4,05																		
	2	1,73%					0,54%			4	1,5%				3,06%			0,45%			
1,9	2,4																			4,4	
	0,8																				
	1,2		3,96			4,12				3,61	3,5			4,05				3,4	3,48		
	1,6						4,15														
2,2	2	4,1	3,41%				0,72%			3,14%				1,25%					2,35%		
	2,4													4							
	0,8																				
	1,2					3,78	3,75			3,84				3,62	3,53			3,61			
2,5	1,6																	3,6			
	2						0,8%			3,9	1,54%			2%	1,97%				0,28%		
	2,4									4											
	0,8																				
2,5	1,2																				
	1,6									3,83	3,9			3,57				3,87			
	2													3,6	0,83%			3,2%	3,75		
	2,4																				
3	0,8																				
	1,2																				
	1,6																				
	2																				
3	2,4																				
	0,8																				
	1,2																				
	1,6																				
3	2																				
	2,4																				
	0,8																				
	1,2																				
3	1,6																				
	2																				
	2,4																				
	0,8																				
3	1,2																				
	1,6																				
	2																				
	2,4																				

Рис. 3. Комбинационный квадрат с отмеченными малыми клетками значениями факторов в каждом из 25 опытов с указанными в каждой из этих клеток соответствующими значениями относительных удельных сил выдавливания

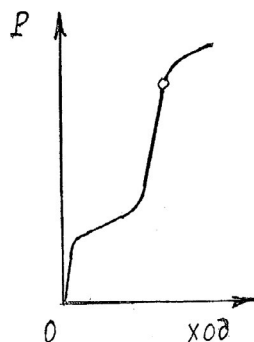


Рис. 4. График изменения силы по ходу выдавливания заготовки ступенчатым пуансоном

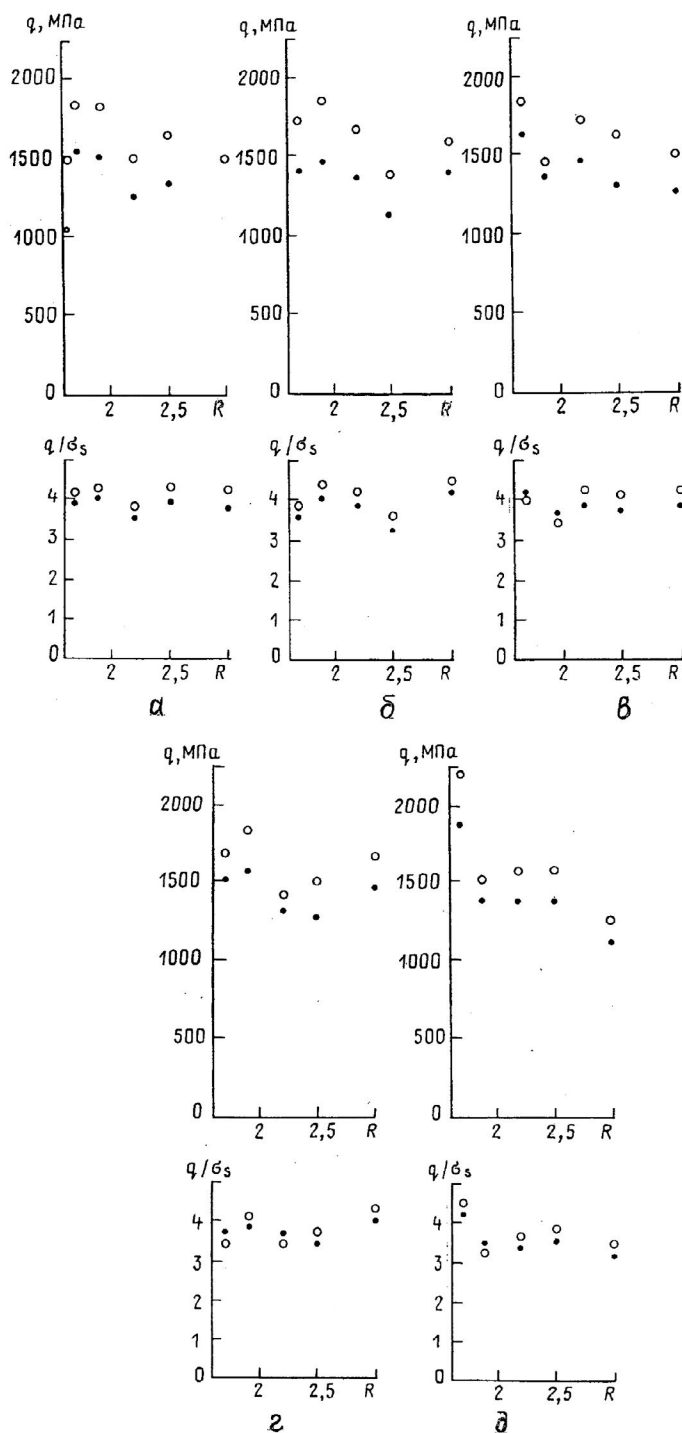


Рис. 5. Экспериментально определенные удельные силы выдавливания:

• – сплав Д1; ○ – медь М1;

а – $r_1 = 1,1$; б – $r_1 = 1,2$; в – $r_1 = 1,3$; г – $r_1 = 1,4$; д – $r_1 = 1,5$

На рис. 5 видно, что величины относительной удельной силы выдавливания одним и тем же пуансоном заготовок из алюминиевого сплава и меди незначительно различаются между собой. Различие может быть объяснено неодинаковым трением между этими материалами и деформирующим инстру-

ментом. За истинные значения величин относительных удельных сил были приняты средние между значениями, полученными при экспериментах на двух исследованных материалах. Эти средние значения записаны в соответствующих малых клетках комбинационного квадрата на рис. 3.

При обработке экспериментальных данных по каждой строке и столбцу комбинационного квадрата подсчитали среднее арифметическое результатов. Таким путем влияние трех факторов усреднили

и выявили влияние четвертого. Операции усреднения и полученные описанным образом данные приведены в *табл. 1* и *2*.

Таблица 1

Результаты определения q/σ_s в зависимости от относительного радиуса матрицы R и относительного радиуса ступени пуансона r_1

R	r_1						
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	Сумма по строке	
1,7	4,05	3,7	4,0	3,6	4,4	19,75	3,95
1,9	4,1	4,15	3,5	4,0	3,4	19,15	3,83
2,2	3,75	3,9	4,0	3,55	3,6	18,8	3,76
2,5	4,05	3,4	3,9	3,6	3,75	18,7	3,74
3,0	4,0	4,4	4,0	4,2	3,3	19,9	3,98
Сумма по столбцу	19,95	19,55	19,4	18,95	18,45	96,3	—
Среднее по столбцу	3,99	3,91	3,88	3,79	3,69	—	3,852

По усредненным данным построены графики (*рис. 6*). Графики показывают, что зависимости q/σ_s от r_1 и l являются линейными, зависимости q/σ_s от R и r_2 имеют более высокую степень. График $q/\sigma_s = f(R)$ по форме близок к алогичному графику

при выдавливании гладкими пуансонами. Характер изменения $q/\sigma_s = f(r_2)$ объясняется ростом по мере увеличения r_2 объема очага пластической деформации, а также силы контактного трения ввиду повышения давления на стенку матрицы.

Таблица 2

Результаты q/σ_s в зависимости от относительной длины пуансона до ступени l и относительного радиуса галтели пуансона r_2

l	r_2						
	0	0,6	1,2	1,8	2,4		
0,8	3,3	3,6	3,4	3,5	3,75	17,55	3,51
1,2	3,7	3,4	4,0	3,55	3,9	18,55	3,71
1,6	3,6	4,0	3,6	4,05	4,15	19,4	3,88
2,0	4,1	3,9	4,0	3,75	4,2	19,95	3,99
2,4	4,0	4,05	4,0	4,4	4,4	20,85	4,17
Сумма по столбцу	13,7	18,95	19,0	19,25	20,4	96,3	—
Среднее по столбцу	3,74	3,79	3,8	3,85	4,08	—	3,852

Из четырех факторов на относительную удельную силу выдавливания наиболее влияет r_1 . При возрастании r_1 на 0,1 величина q/σ_s увеличивается на 0,0375. Сказанное относится к влиянию фактора в среднем в пределах принятого диапазона его изменения. Однако, при изменении R от 1,9 до 1,7

величина q/σ_s изменяется на 0,19. Следовательно, на этом участке наиболее сильным по влиянию является фактор R .

Для построения математической модели, описывающей выявленные влияния, была проведена описанная ниже обработка графических зависимостей.

Для нейтрализации влияния факторов r_1 и l все данные были пересчитаны на значения $r_1 = 1$ и $l = 0$. Например, число 4, стоящее в центральной большой клетке комбинационного квадрата и относящееся к величинам $r_1 = 1,3$ и $l = 2,4$, было уменьшено на $[(1,3 - 1) / 0,1] \times 0,0375 = 0,9$ и увеличено на $[(1,3 - 1) / 0,1] \times 0,05 = 0,15$, после чего оно стало равным 3,25. Число 4,05, стоящее в первой большой клетке верхнего ряда и относящееся

к $r_1 = 1,1$ и $l = 1,6$, было уменьшено на $[(1,6 - 0) / 0,1] \times 0,0375$, увеличено на $[(1,1 - 1) / 0,1] \times 0,05$ и стало равным 3,5.

В соответствии с этим пересчетом в аналитическую формулу, которой ниже будет описано влияние факторов, входят слагаемые $0,375 l - 0,5 (r_1 - 1)$.

После пересчета указанным выше способом результаты, сгруппированные в зависимости от R и r_2 , приведены в табл. 3 (цифры без скобок).

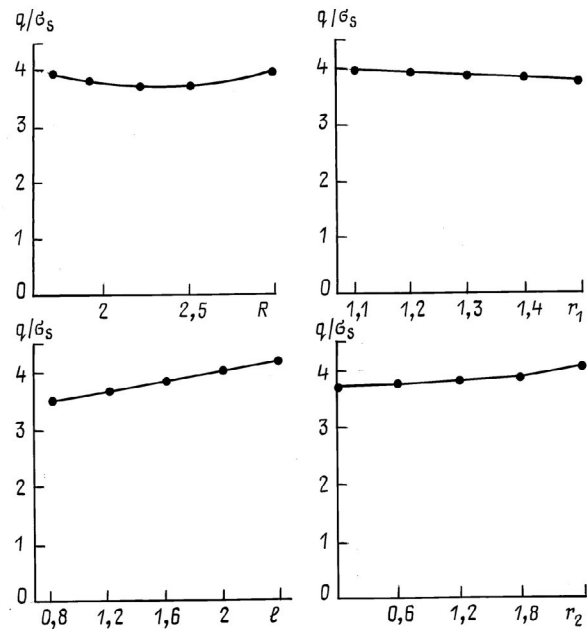


Рис. 6. Графики зависимостей относительной удельной силы выдавливания от рассматриваемых факторов

Таблица 3

Результаты промежуточных расчетов для определения свободного члена математической модели

R	r ₂						Среднее по строке
	0	0,6	1,2	1,8	2,4	Сумма по строке	
1,7	3,35 (3,14)	3,5 (3,27)	3,4 (3,1)	3,5 (3,09)	3,75 (3,18)	17,5 (15,78)	3,5 (3,156)
1,9	3,4 (3,3)	3,2 (3,08)	3,3 (3,11)	3,35 (3,05)	3,65 (3,19)	16,9 (15,73)	3,38 (3,146)
2,2	3,25 (3,24)	3,25 (3,22)	3,25 (3,15)	3,3 (3,09)	3,5 (3,13)	16,55 (15,83)	3,31 (3,166)
2,5	3,2 (3,19)	3,2 (3,17)	3,2 (3,1)	3,25 (3,04)	3,6 (3,23)	16,45 (15,37)	3,29 (3,146)
3,0	3,25 (3,04)	3,55 (3,32)	3,6 (3,3)	3,6 (3,19)	3,65 (3,08)	17,65 (15,93)	3,53 (3,186)
Сумма по столбцу	16,45 (15,91)	16,7 (16,06)	16,75 (15,76)	17 (15,46)	18,15 (15,81)	85,05 (79)	—
Среднее по столбцу	3,29 (3,182)	3,34 (3,212)	3,35 (3,152)	3,4 (3,092)	3,63 (3,162)	—	3,402 (3,16)

Изменение в зависимости от R усредненных по r_2 результатов (крайний правый столбец табл. 3) достаточно точно описывается формулой $0,5(R - 2,35)^2$. Для нейтрализации влияния R каждое значение q/σ_s было уменьшено на величину, подсчитанную по этой

формуле. Характер изменения в зависимости от r_2 усредненных по R результатов (нижняя строка табл. 3) позволил установить, что для нейтрализации фактора r_2 необходимо вычесть из каждого значения q/σ_s величину, подсчитанную по формуле $(0,25 r_2)^2$.

Нейтрализуя по найденным зависимостям влияние всех четырех факторов на экспериментальные данные, получили значения, записанные в *табл. 3* в скобках. Эти значения значительно меньше различаются между собой, чем указанные в малых клетках комбинационного квадрата на *рис. 3*. Их среднее арифметическое равно 3,16.

Результаты исследования

Окончательный вид искомой формулы математической модели

$$q/\sigma_s = 0,5(R - 2,35)^2 - 0,5(r_1 - 1) + (0,25 r_2)^2 + 0,375 l + 3,16. \quad (2)$$

Рассчитанные по формуле (2) значения относительных удельных сил выдавливания для примененных в эксперименте пуансонов приведены в больших клетках комбинационного квадрата на *рис. 3*. Там же в процентах указаны расхождения расчетных и экспериментальных данных. Наибольшее их расхождение между собой равно 4%.

Если применить полученную математическую модель к оценке относительной удельной силы выдавливания гладким пуансоном с цилиндрической боковой поверхностью, не имеющей ступеней, то останутся только следующие члены модели:

$$q'/\sigma_s = 0,5(R - 2,35)^2 + 3,16. \quad (3)$$

В соответствии с формулой (3), при $R = 2,35$ сила минимальна, и этот минимум равен 3,16. Такие значения типичны для выдавливания гладкими пуансонами, имеющими боковую поверхность без ступени [1].

Библиографический список

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка деталей из компактных и порошковых материалов / Е.Г. Белков, Г.В. Бунатян, А.Л. Воронцов и др. 2-ое изд. / Под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.

2. Научно-технические технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др. / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

3. Дмитриев А.М., Гречников Ф.В., Коробова Н.В. Повышение стойкости ступенчатых пуансонов при холодном выдавливании стаканов // Вестник машиностроения. – 2017. – № 2. – С. 73–81.

4. Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Горбаченко М.А. Оптимизация формы пуансонов для холодного выдавливания ступенчатых полостей стаканов из малопластичных алюминиевых сплавов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Выпуск 11. – Часть 1. – С. 7–20.

5. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов и др.; Под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 640 с.

References

1. Forging and stamping: Handbook. In 4 volumes. Vol. 3. Cold volume stamping of parts from compact and powder materials / E.G. Belkov, G.V. Bunatyan, A.L. Vorontsov, et al. 2nd ed. / Under the general editorship of E.I. Semenov. Moscow: Mechanical Engineering, 2010. – 352 p.

2. Science-intensive technologies in mechanical engineering / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Bezzyazchny, et al. / Under the editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mechanical Engineering, 2012. – 528 p.

3. Dmitriev A.M., Grechnikov F.V., Korobova N.V. Increasing the durability of stepped punches during cold extrusion of cups. *Bulletin of mechanical engineering*. 2017. No. 2. – P. 73-81.

4. Dmitriev A.M., Korobova N.V., Gorbachenko M.A. Optimization of the shape of punches for cold extrusion of stepped cavities of cups from low-plasticity aluminum alloys. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2017. Issue 11. Part 1. – P. 7-20.

5. Handbook of structural materials: Handbook / B.N. Arzamasov, T.V. Solovieva, S.A. Gerasimov et al.; Under the editorship of B.N. Arzamasov, T.V. Solovieva. – Publishing house of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 2006. – 640 p.

Информация об авторах

Дмитриев Александр Михайлович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор
countess.olga@gmail.com

Коробова Наталья Васильевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой систем
пластического деформирования, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
mt-6@yandex.ru

Information about the authors

Dmitriev Alexander Mikhailovich – corresponding member of the Russian Academy of Sciences,
D.Sc. of Engineering, Professor
countess.olga@gmail.com

Korobova Natalya Vasilievna – D.Sc. of Engineering, head of the sub-department of “Plastic Deformation
Systems”, MSUT “STANKIN”
mt-6@yandex.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 93–101.

УДК 621.777.073

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 93–101.

А.А. Мышечкин, В.В. Зуев, Е.В. Преображенская, С.В. Скрипник ✉

РТУ МИРЭА

✉ Автор для корреспонденции

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ КОЛПАЧКОВОЙ ГАЙКИ

Аннотация

В работе с использованием цифрового моделирования разработан и исследован технологический процесс горячей штамповки высокопрочных гаек. Определена схема технологического процесса и сила штамповки, размеры заготовки, исследовано напряженно-деформированное состояние и температура металла по объему поковки по переходам штамповки при использовании обычной осадки заготовки перед ее штамповкой и специальной осадки с формированием на заготовке конической части. На основе анализа результатов цифрового моделирования технологического процесса горячей штамповки установлено, что для производства колпачковых гаек рекомендуется следующий технологический процесс горячей штамповки: отрезка и нагрев заготовок до температуры горячей штамповки, специальная осадка с формированием на заготовке заходного конуса с углом 25°, горячая штамповка гайки за один переход. Использование предложенного технологического процесса позволяет получить поковку колпачковой гайки с последующей минимальной механической обработкой. По результатам моделирования процесса предложена технологическая оснастка для горячей штамповки колпачковой гайки. Полученные результаты могут быть использованы на практике.

Ключевые слова: высокопрочные крепежные изделия, класс прочности, гайка, марка стали, предел прочности, технологические переходы, горячая штамповка, нагрев, осадка, напряжения, деформации, сила.

Для цитирования: Мышечкин А.А., Зуев В.В., Преображенская Е.В., Скрипник С.В. Разработка и исследование цифровым моделированием технологического процесса горячей штамповки высокопрочной колпачковой гайки // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 93–101.

A.A. Myshechkin, V.V. Zuev, E.V. Preobrazhenskaya, S.V. Skripnik ✉

MIREA – Russian Technological University

✉ Corresponding author

DEVELOPMENT AND RESEARCH BY DIGITAL MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF HOT STAMPING OF A HIGH-STRENGTH CAP NUT

Abstract

The technological process of hot stamping of high-strength nuts has been developed and investigated using digital modeling. The scheme of the technological process and the punching force, the dimensions of the workpiece are determined, the stress-strain state and temperature of the metal in terms of forging volume along the stamping transitions are investigated when using a conventional billet draft before stamping and a

special draft with the formation of a conical part on the billet. Based on the analysis of the results of digital modeling of the technological process of hot stamping, it was found that the following technological process of hot stamping is recommended for the production of cap nuts: cutting and heating the workpieces to the temperature of hot stamping, a special deposit with the formation of an entrance cone with an angle of 25° on the workpiece, hot stamping of the nut in one transition. The use of the proposed technological process makes it possible to obtain the forging of the cap nut with subsequent minimal machining. Based on the results of process modeling, technological equipment for hot stamping of the cap nut is proposed. The results obtained can be used in practice.

Keywords: high-strength fasteners, strength class, nut, steel grade, ultimate strength, technological transitions, hot stamping, heating, precipitation, stresses, deformations, force.

For citation: Myshechkin A.A., Zuev V.V., Preobrazhenskaya E.V., Skripnik S.V. Development and research by digital modeling of the technological process of hot stamping of a high-strength cap nut. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2025. No 1 (72). P. 93–101. (In Russian)

Введение

В последнее время высокопрочные крепежные изделий находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности (атомное и энергетическое машиностроение, мостостроение, авиа- и автомобилестроение). При этом требования к таким изделиям (прочность, надежность, коррозионная стойкость и др.) постоянно повышаются [1,2,3,4,5,6,7].

Согласно международной классификации резьбовых крепежных изделий к высокопрочным болтам, винтам, шпилькам относятся изделия, имеющие предел прочности не менее 800 МПа и цифровую маркировку классов прочности 8.8, 9.8, 10.9, 12.9, а к сверхпрочным – 14.9. Это важнейшая из характеристик, которая обязательно учитывается в любом проекте. Чем выше эти значения, тем прочнее, выносливее, качественнее крепежные изделия. Первая цифра указывает на предельную нагрузку на растяжение, при которой крепеж разорвется. Эта величина называется пределом прочности на разрыв, определяется как одна сотая от номинального временного сопротивления, выражается в МПа или Н/мм². Вторая цифра определяется как отношение предела текучести к пределу прочности.

Прочностные характеристики болтовых изделий определяются выбором соответствующей марки стали и технологией изготовления. Наибольшее применение для изготовления высокопрочного крепежа имеют стали 35, 35X, 38XA, 40, 40Г2, 40X Селект, 38XA, 30ХГСА, 35ХГСА, 40ХН2МА, 38ХГНМ. Реже используют слаболегированные борсодержащие стали марок 12Г1Р, 20Г2Р, 30-35Г1Р. Стали, легированные бором, обладают благоприятным сочетанием прочностных и пластических свойств, но из-за некоторых техно-

логических трудностей при выплавке, их внедрение в метизное производство сдерживается. Кроме того, ряд исследований и опыт применения данной стали накладывают определенные ограничения на ее применение по климатическим (температурным) условиям [1,4,6].

Для изготовления высокопрочных крепежных изделий применяют методы холодной и горячей объемной штамповки. Крепежные изделия с классом прочности 4.6-6.8 изготавливаются в основном методами холодной объемной штамповки. Для высокопрочных изделий применяют методы холодной и горячей объемной штамповки. Однако для наиболее ответственных конструкций в энергетическом машиностроении, мостостроении высокопрочные крепежные изделия с классом прочности выше 8.8 изготавливаются методами горячей штамповки с последующей термической обработкой.

В настоящее время, в связи с быстрым развитием различных отраслей машиностроения и снижением импорта, в России актуальным является расширение производства качественных высокопрочных крепежных изделий, в т.ч. болтов с шестигранными головками, гаек, соответствующих требованиям современных стандартов. Общие технические условия на высокопрочные болты, гайки и шайбы для металлических конструкций регламентированы ГОСТ Р 52643-2006 (с изменением 1). В стандарте установлены требования по маркам сталей и механическим характеристикам для болтов, гаек и шайб, правилам приемки, методам приемочных испытаний, нагрузкам для испытаний болтов и гаек. Настоящий стандарт содержит также рекомендации по порядку использования сталей, не предусмотренных стандартом, эталонам микроструктуры для испытаний на обезуглероживание (науглероживание) и соответствие микроструктуры, методам

испытаний на стойкость к замедленному хрупкому разрушению и трещиностойкость. ГОСТ 9064-75 (с изменениями) регламентирует типы и основные размеры гаек для фланцевых соединений паровых и газовых турбин, паровых котлов, трубопроводов и соединительных частей, арматуры, приборов, аппаратов и резервуаров с температурой среды от 0 до 650°C. При этом гайки для фланцевых соединений делятся на 2 типа: тип А – гайка шестигранная для фланцевых соединений, корпусов цилиндров паровых и газовых турбин, трубопроводов и соединительных частей, паровых котлов, арматуры, приборов, аппаратов и резервуаров и тип Б – гайка колпачковая для фланцевых соединений корпусов цилиндров паровых и газовых турбин, стопорных и регулирующих клапанов и других соединений паровых котлов, паровых и газовых турбин.

Целью настоящей работы является:

- исследование и выбор оптимальных параметров технологического процесса горячей штамповки высокопрочных колпачковых гаек с использованием цифрового моделирования в программе QForm;
- разработка технологической оснастки и рекомендаций по использованию предложенной технологии.

Основная часть

В настоящей работе выполнено исследование технологического процесса колпачковых гаек.

На *рис. 1* представлена колпачковая шестигранная гайка БМ36.

При разработке технологического процесса вначале составляется чертеж штампованной заготовки (поковки), назначаются припуски, допуски, напу-

ски. На основе анализа технологических процессов горячей штамповки установлено, что аналогичные поковки в зависимости от соотношения размеров и глубины полости штампуют за два-три перехода, включая осадку. При разработке технологии штамповки необходимо учитывать также, что деталь (поковка) в штампе имеет увеличенные размеры в сравнении с холодной поковкой. Поэтому размеры инструмента выполняются по чертежу горячей поковки.

Для детальной разработки технологического процесса и проведения моделирования использована шестигранная колпачковая гайка БМ36 из стали 35ХМ. Горячая и холодная поковка гайки БМ-36 представлены на *рис. 2*.

После построения чертежа поковки и определения ее объема заготовка для получения данной поковки, с учетом отходов, имеет размеры D45x97мм.

На основе конструктивно-технологического анализа гайки предложен следующий технологический процесс: отрезка исходной заготовки, индукционный нагрев до температуры горячей штамповки, осадка заготовки, горячая штамповка за один переход.

Для исследования технологических процессов обработки металлов давлением в последнее время широко применяются методы компьютерного моделирования. В частности, для горячего объемного формоизменения (ковки, горячей объемной штамповки, выдавливания) в последнее время успешно используют программные комплексы, основанные на методе конечных элементов и позволяющие моделировать формоизменение металлов с учетом действия различных факторов [8,9,10]. В настоящей работе для разработки технологического процесса использована программа QForm. В соответствии с

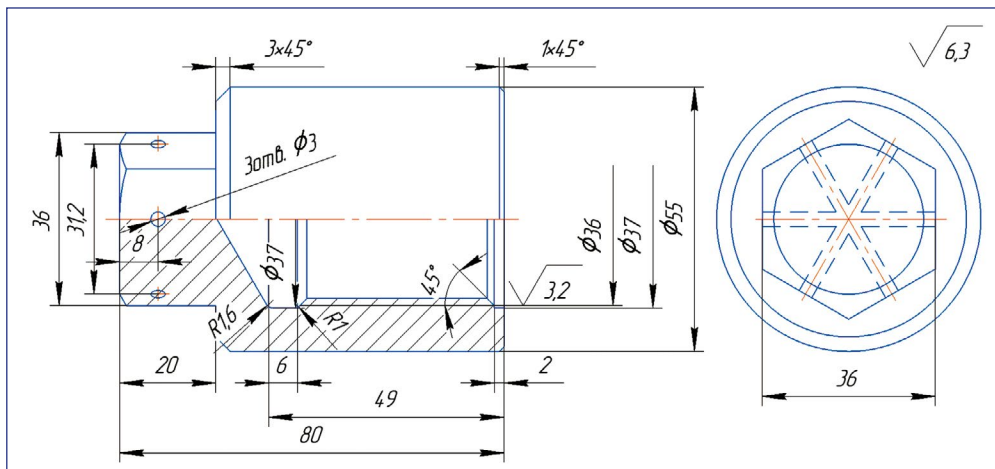


Рис.1. Гайка шестигранная колпачковая

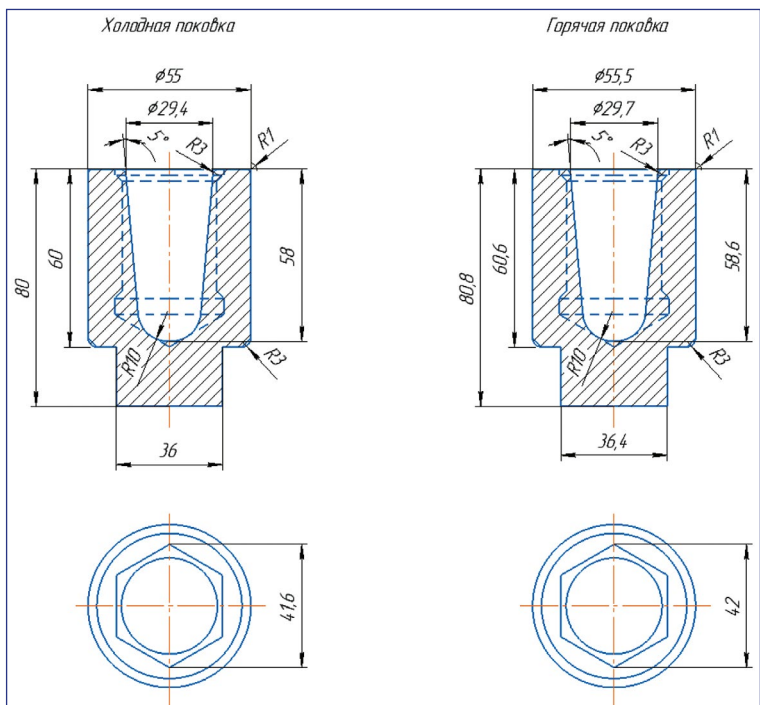


Рис. 2. Холодная и горячая поковка колпачковой гайки БМ 36

методикой моделирования в графическом редакторе была подготовлена технологическая оснастка, из базы данных программы QForm введены исходные данные (температура нагрева металла и его механические характеристики, условия трения, материал и условия остановки инструмента, его температура, условия работы, вид и характеристики оборудования и др.).

Далее проводился процесс цифрового моделирования. Моделирование проводилось с использованием закона трения Леванова со стандартными параметрами, фактор трения $m=0.4$, в качестве смазки использован графит с водой. Для уменьшения охлаждения (подстуживания) заготовки в процессе штамповки использован подогрев инструмента до 200°C . Температура нагрева заготовки – 1200°C . Сопротивление деформации стали при заданной температуре горячей штамповки в зависимости от степени и скорости деформации принимается из базы данных программы QForm.

Моделирование технологического процесса показало, что при штамповке за один переход (осадка + штамповка) получаемая поковка имеет дефект (зажим) (рис. 3). Анализ формоизменения заготовки в процессе штамповки показывает, что образование дефекта происходит вследствие того, что на втором

этапе процесса штамповки при формообразовании шестигранника скорость течения металла превышает скорость движения пуансона ($V_m > V_n$). Поэтому между пуансоном и металлом образуется полость. На заключительной стадии процесса штамповки скорость пуансона превышает скорость течения металла и полость «схлопывается», образуя зажим.

Следовательно, для горячей штамповки поковки колпачковой гайки необходимо изменить характер формоизменения заготовки.

Для изменения характера формоизменения заготовки и исключения зажима при штамповке колпачковой гайки предложено штамповать ее за

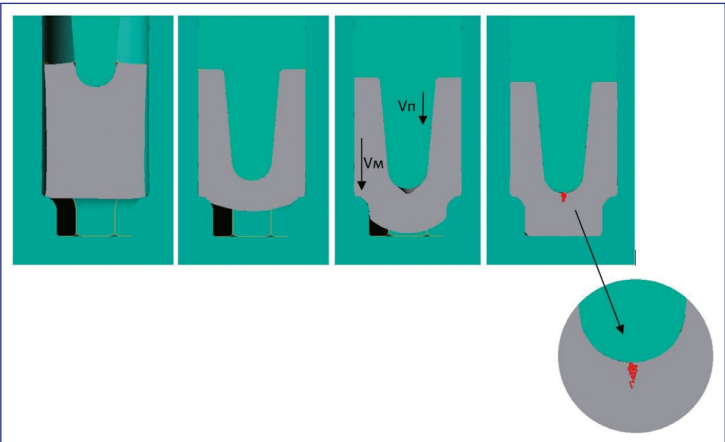


Рис. 3. Последовательность заполнения полости штампа и образование дефекта

2 штамповочных перехода. Вначале происходит осадка заготовки, диаметр осаженной заготовки на 2–4 мм меньше диаметра поковки. Далее выполняется предварительный переход с выдавливанием стержневой части и наметкой отверстия (а) и затем во втором переходе происходит окончательная штамповка (б) (рис. 4). Диаметр и высота выдавливаемой стержневой части принимаются в пределах: $D = (0,8 - 0,9)S$, $l_0 = (0,9 - 1,0)h$. Наметка отверстия улучшает центрирование пуансона на следующем переходе.

На предварительном переходе температура по сечению поковки находится в пределах 1205–917°C, накопленная пластическая деформация $\epsilon = 0,12 - 1,68$, наибольшее технологическое усилие – 520 кН. На втором переходе температура по сечению поковки находится в пределах 1214–882°C, накопленная пластическая деформация $\epsilon = 0,25 - 6,8$, наибольшее технологическое усилие равно 2448 кН.

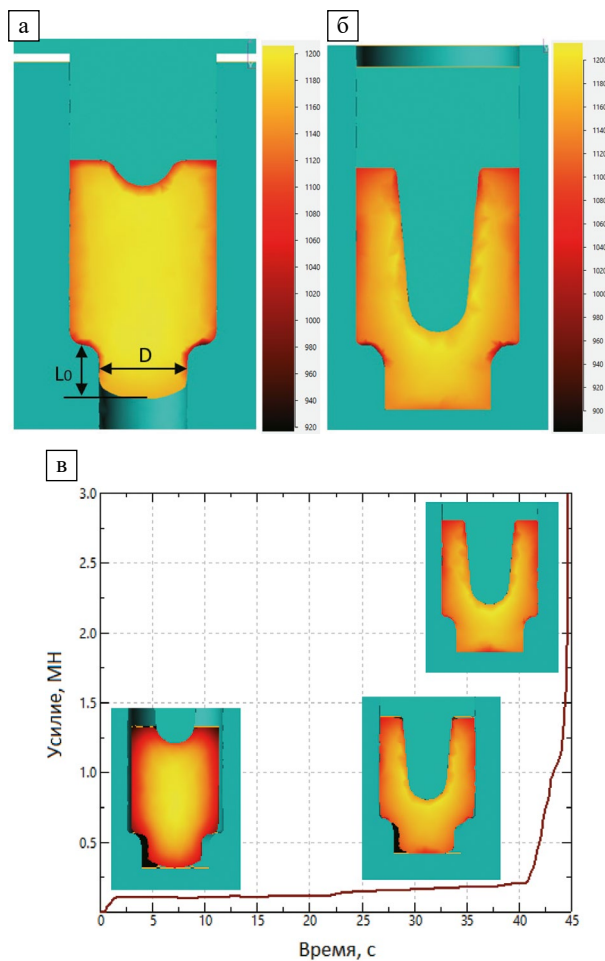


Рис. 4. Горячая штамповка гайки БМ36 за 2 перехода: а – предварительный переход, б – окончательный переход, в – график изменения усилия на окончательном переходе и распределение температуры по сечению

Анализ течения металла и возможного дефектообразования показал, что поковка дефектов не имеет.

Для упрощения технологического процесса и использования одного штамповочного перехода предложено вместо обычной использовать специальную осадку, при которой одновременно с уменьшением высоты заготовки и увеличением ее диаметра происходит оформление конического участка в нижней части заготовки (рис. 5). Наличие такого конического участка изменяет характер течения металла при штамповке и предотвращает складкообразование. При этом был исследован процесс с использованием осадочной матрицы с конусообразным отверстием (а), матрицы с калибрующим пояском (б) и с двойным конусом (в). Использование матриц с калибрующим пояском и двойным конусом позволяет оптимизировать течение металла при последующей штамповке.

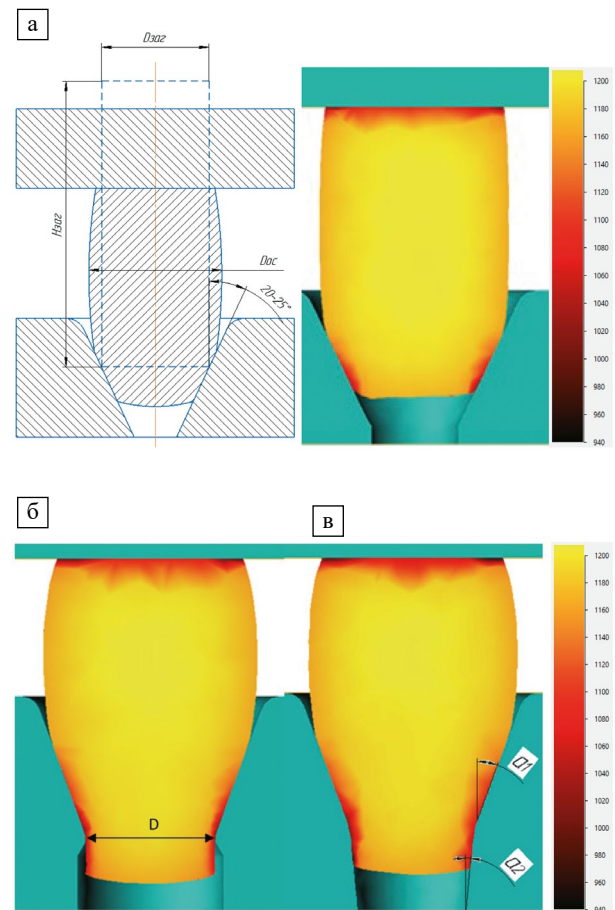


Рис. 5. Специальная осадка заготовки: а – конусообразная, б – с калибрующим пояском, в – с двойным конусом и распределение температуры по сечению

Однако, при использовании матрицы с калибрующим пояском будет затруднено извлечение заготовки после осадки. Поэтому рекомендуется использовать осадочную матрицу с двойным конусом: верхний конус $\alpha_1 = 20\text{--}25^\circ$, нижний $\alpha_2 = 5\text{--}7^\circ$.

Размеры исходной заготовки (диаметр $-D_{\text{заг}}$, высота $-H_{\text{заг}}$) определяются с учетом объема получаемой поковки, рекомендуемого отношения высоты заготовки к ее диаметру ($H_{\text{заг}}/D_{\text{заг}} \leq 2,5$), требуемого диаметра заготовки после осадки [$D_{\text{ос}} = D_{\text{м}} - (2\text{--}4 \text{ мм})$], с учетом влияния диаметра заготовки на высоту получаемой конической части. $D_{\text{м}}$ – диаметр матрицы для штамповки (диаметр горячей поковки).

На основе вышеизложенного, а также анализа известных рекомендаций по разработке технологических процессов при исследовании и отработке технологии штамповки использовалась заготовка диаметром $D_{\text{заг}} = 42\text{--}46 \text{ мм}$, высотой $H_{\text{заг}} = 110,5\text{--}92 \text{ мм}$.

На характер течения металла при такой осадке и высоту отростка влияет также угол конусности матрицы при осадке. При моделировании угол верхнего конуса принят 20° , нижнего -7° .

Результаты цифрового моделирования процесса горячей штамповки колпачковой гайки с исполь-

зованием специальной осадки представлены на рис. 6, 7.

Анализ результатов моделирования показывает, что использование вместо обычной специальной осадки позволяет получить поковку гайки без дефектообразования с использованием одного штамповочного перехода. Температура по сечению поковки находится в пределах $1214\text{--}862^\circ\text{C}$ и соответствует температурному интервалу горячей штамповки. Среднее напряжение по сечению поковки изменяется от -89 до -985 МПа , причем в основной части поковки $\sigma_{\text{ср}} = 500\text{--}985 \text{ МПа}$. Накопленная пластическая деформация максимальное значение ($6,0\text{--}7,7$) имеет только в области контакта пуансона с заготовкой, в остальных областях заготовки деформация распределена более равномерно и составляет $0,5\text{--}3,5$.

При анализе силовых параметров технологического процесса установлено, что минимальное усилие штамповки ($P = 2,25 \text{ МН}$) наблюдается при следующих условиях: диаметр заготовки $D = 42 \text{ мм}$, высота $H = 110,5 \text{ мм}$, угол конусности -25° (рис. 7).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности штамповки колпачковой гайки с использованием специальной осадки и одной штамповочной операции.

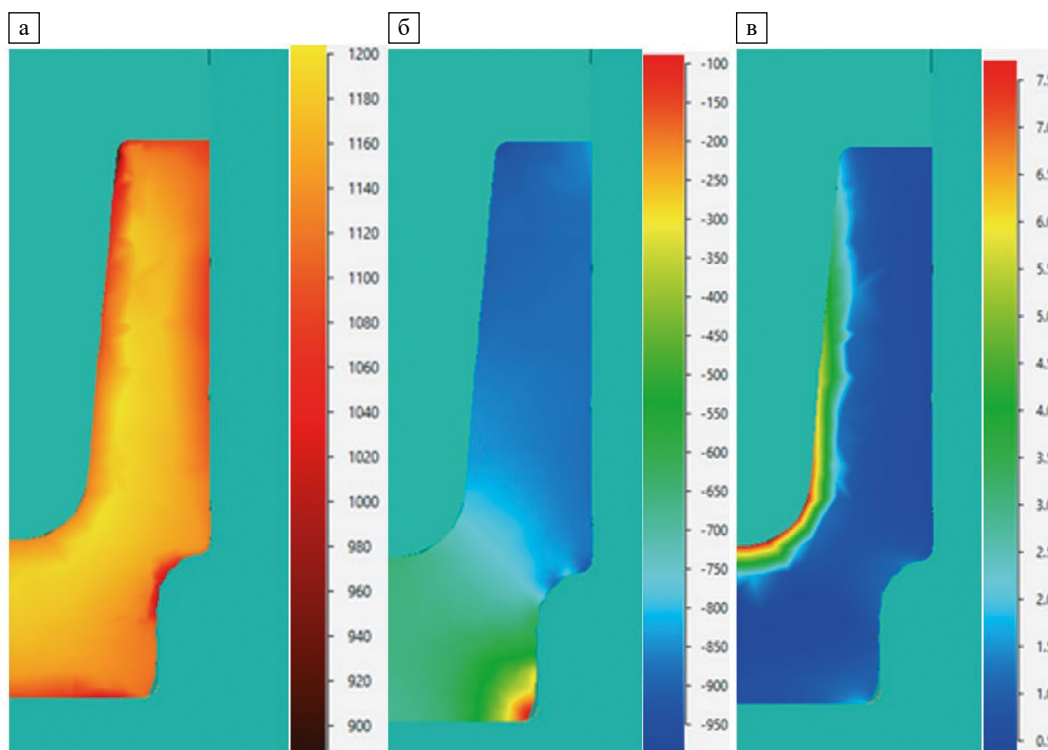


Рис. 6. Штамповка колпачковой гайки БМЗ6 с прошивкой отверстия за один переход с использованием специальной осадки и распределение температуры (а), среднего напряжения (б) и пластической деформации (в) по сечению поковки

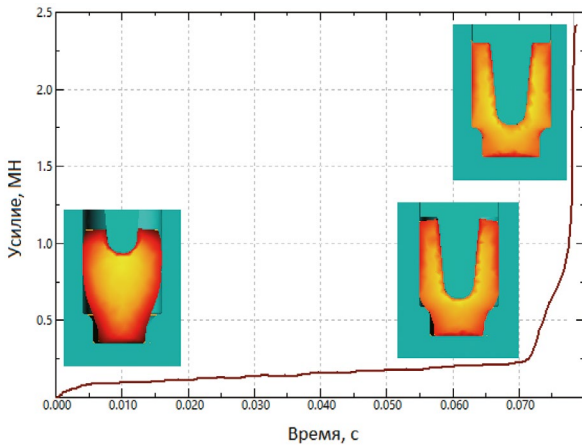


Рис.7. График изменения усилия штамповки

На основе полученных результатов разработана технологическая оснастка для штамповки колпачковой гайки. На рис. 8 представлен штамп для горячей штамповки колпачковой гайки с использованием специальной осадки и одной штамповочной операции. Штамповку предпочтительно проводить на кривошипном горячештамповочном прессе.

После нагрева заготовки происходит ее осадка в матрице для осадки 2, при этом $D_{oc} = D - 2 \div 4$ мм. Далее осажженная заготовка устанавливается в матрицу 5 и происходит горячая штамповка поковки колпачковой гайки. Матрица для штамповки выполнена сборной, состоящей из нижней 4 и верхней 5 частей, установленных во внутреннем 6 и внешнем 7 бандаже. Размеры инструмента (e , D , H) соответствуют размерам горячей поковки (рис. 2).

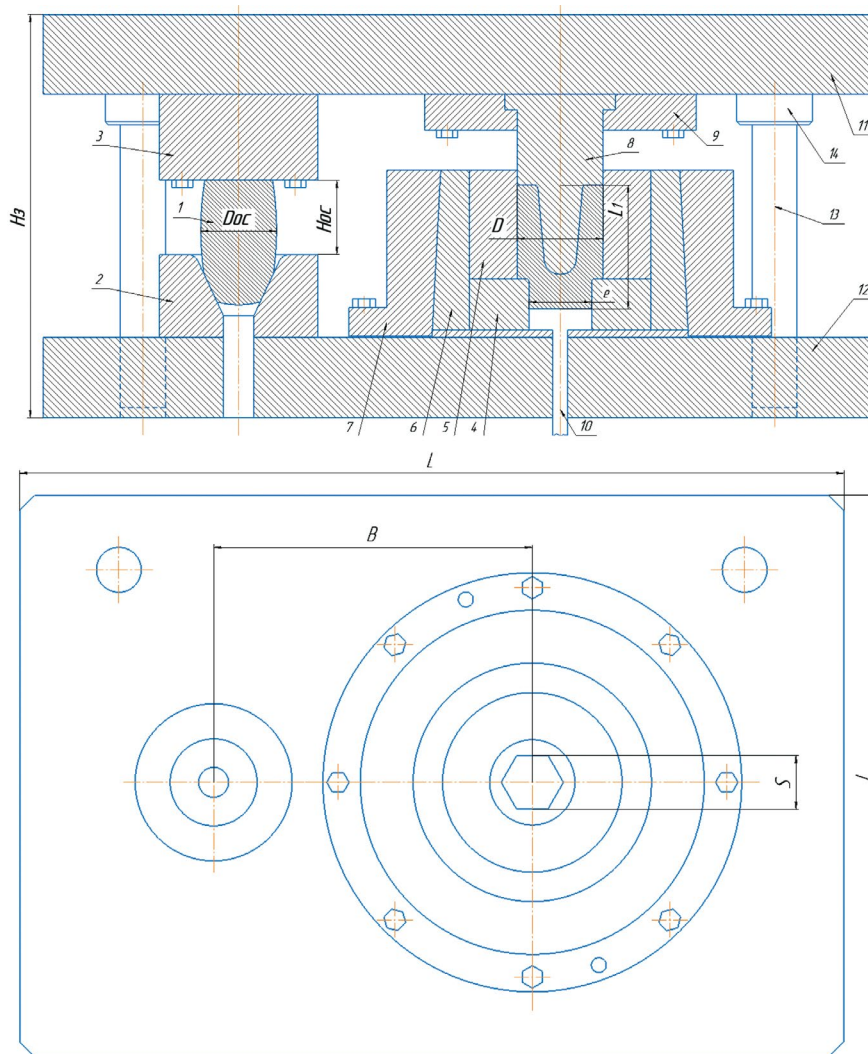


Рис. 8. Штамп для горячей штамповки колпачковой гайки:

- 1 – осаживаемая заготовка; 2 – матрица для осадки; 3 – плита осадочная верхняя; 4 – матрица нижняя;
5 – матрица верхняя; 6 – бандаж внутренний; 7 – бандаж внешний; 8 – пуансон;
9 – пуансонодержатель; 10 – выталкиватель; 11 – плита верхняя; 12 – плита нижняя;
13 – колонка направляющая; 14 – втулка направляющая

Заключение

Таким образом, на основе результатов анализа производственных данных и цифрового моделирования горячей штамповки колпачковых гаек установлено, что для производства колпачковых гаек рекомендуется следующий технологический процесс горячей штамповки:

- отрезка заготовки,
- нагрев заготовок до температуры горячей штамповки,
- специальная осадка,
- горячая штамповка гайки за один переход.

Использование предложенного технологического процесса и штамповой оснастки позволяет получить заготовку с последующей минимальной обработкой

Библиографический список

1. Агеев В.С., Хусид Р.Г., Кулиев И.И. Высокопрочные болты с накатной резьбой для мостостроения // Метизы. – № 1. – 2007. – С. 62–66.
2. Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Основные направления развития производства высокопрочного крепежа // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 8-4. – С. 30–35.
3. Агеев В.С. Разработка стандартов на комплекты высокопрочного крепежа // Крепеж, клеи, инструмент. – 2012. – № 4. – С. 21–24.
4. Мышечкин А.А., Осадчий В.Я. Машины и технология метизного производства. – М., 2008. – 469 с.
5. Лавриненко В.Ю. Математическое моделирование процессов холодной объемной штамповки крепежных изделий // Метизы. – 2007. № 1. – С. 66–69.
6. Сотсков Н.И., Шнейдеров Г.Р., Медведев Ю.В., Метелев Ю.А., Терехова А.И., Соколов А.А. О поиске стали для высокопрочных болтов класса прочности 12.9 // Крепеж, клеи, инструмент. – № 2. – 2021. – С. 27–29.
7. Штеле В.Г., Маркечко И.В., Грязнов В.В., Попов А.Ю., Панков А.Ю. Разработка прогрессивной технологии штамповки высоких гаек // Машиностроение и машиноведение. Омский научный вестник. – № 2. – 2013. – С. 66–69.
8. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: учебное пособие под ред. А.В. Власова / А.В.Власов, С.А.Стебунов, С.А.Евсюков, Н.В.Биб, А.А.Шитиков. –М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э.Баумана, 2019. – 383 с.
9. Мышечкин А.А., Юсупов В.С., Преображенская Е.В., Скрипник С.В. Моделирование процесса

горячей штамповки оправки прошивного стана // Сталь. – № 10. – 2022. – С. 30–34.

10. Мышечкин А.А., Юсупов В.С., Скрипник С.В. Определение оптимальных параметров процесса горячей объемной штамповки оправки прошивного стана моделированием в программе QFORM // Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». – 2023. – № 21. – С. 9–16.

References

1. Ageyev V.S., Khusid R.G., Kuliev I.I. High-strength bolts with rolled thread for bridge construction. *Hardware*. No. 1, 2007, p. 62–66.
2. Filippov A.A., Pachurin G.V. Main directions of development of high-strength fasteners production. *International journal of applied and fundamental research*. 2014. No. 8-4. P. 30–35.
3. Ageyev V.S. Development of standards for high-strength fastener sets. *J. Fasteners, adhesives, tools*. 2012. No. 4. P. 21–24.
4. Myshechkin A.A., Osadchiy V.Ya. Machines and technology of hardware production. M., 2008, 469 p.
5. Lavrinenko V. Yu. Mathematical modeling of processes of cold bulk stamping of fasteners. *Metizy*, No 1, 2007, p. 66–69.
6. Sotskov N. I., Shneiderov G. R., Medvedev Yu. V., Metelev Yu. A., Terekhova A. I., Sokolov A. A. On the search for steel for high-strength bolts of strength class 12.9. *Fasteners, adhesives, tools*. No. 2, 2021, p. 27–29.
7. Shtele V.G., Markechko I.V., Gryaznov V.V., Popov A.Yu., Pankov A.Yu. Development of progressive technology for stamping high nuts. *Mechanical Engineering and Mechanical Engineering. Omsk Scientific Bulletin*, No. 2, 2013, p. 66–69.
8. Finite element modeling of forging and die forging processes: a tutorial edited by A.V. Vlasov / A.V. Vlasov, S.A. Stebunov, S.A. Evsyukov, N.V. Biba, A.A. Shitikov. – M.: Publishing House of the Moscow Higher Technical University named after N. E. Bauman, 2019. 383 p.
9. Myshechkin A. A., Yusupov V. S., Preobrazhenskaya E. V., Skripnik S. V. Modeling the process of hot stamping of a piercing mill mandrel. *Stal*, No. 10, 2022, p. 30–34.
10. Myshechkin A.A., Yusupov V.S., Skripnik S.V. Determination of optimal parameters of the process of hot volume stamping of a piercing mill mandrel by modeling in the QFORM program *Rolling production. Supplement to the journal "Technology of Metals"*. 2023. No. 21. P. 9–16.

Информация об авторах

Мышечкин Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
myshechkin@mirea.ru

Зуев Владимир Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
zuev.mirea@yandex.ru

Преображенская Елена Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
preobr-elena@yandex.ru

Скрипник Сергей Васильевич – инженер кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА
skripnick2014@yandex.ru

Information about the authors

Myshechkin Aleksey Aleksandrovich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
myshechkin@mirea.ru

Zuev Vladimir Valerievich – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
zuev.mirea@yandex.ru

Preobrazhenskaya Elena Viktorovna – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
preobr-elena@yandex.ru

Skripnik Sergey Vasilyevich – engineer at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University
skripnick2014@yandex.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 102–108.

УДК 004.942

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 102–108.

А.А. Акимов ✉, С.Н. Григорьев

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

✉ Автор для корреспонденции

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ИНТЕГРАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ АГРЕГАЦИИ ДАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация

В статье рассмотрены практические аспекты разработки интеграционной платформы агрегации данных производственно-логистической системы (ПЛС) машиностроительных предприятий для проведения анализа их производительности. Предложена структурная модель решения для сбора данных из разнородных информационных систем, отличающаяся гибкостью и масштабируемостью. Разработана модель процессов сбора и объединения данных, которая позволяет автоматизировать процесс агрегации данных для анализа производительности ПЛС.

Ключевые слова: производственно-логистическая система, интеграционная платформа данных, интеграционные модули, структурная модель, агрегация данных, информационные системы.

Для цитирования: Акимов А.А., Григорьев С.Н. Практические аспекты разработки интеграционной платформы агрегации данных производственно-логистической системы машиностроительных предприятий // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 102–108.

А.А. Akimov ✉, S.N. Grigoriev

MSUT “STANKIN”

✉ Corresponding author

PRACTICAL ASPECTS OF DEVELOPING AN INTEGRATION PLATFORM FOR AGGREGATING DATA OF THE PRODUCTION AND LOGISTICS SYSTEM OF MECHANICAL ENGINEERING ENTERPRISES

Abstract

The article considers practical aspects of developing an integration platform for aggregating data from various information management systems of production and logistics systems (PLS) of mechanical engineering enterprises to analyze their performance. A structural model of a solution for collecting data from heterogeneous information systems is proposed, which is flexible and scalable. A model of data collection and consolidation processes has been developed, which allows automating the data aggregation process for analyzing PLS performance.

Keywords: production and logistics system, data integration platform, integration modules, structural model, data aggregation, information systems.

For citation: Akimov A.A., Grigoriev S.N. Practical aspects of developing an integration platform for aggregating data of the production and logistics system of mechanical engineering enterprises. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 102–108. (In Russian)

Введение

Современные машиностроительные предприятия работают в условиях растущей конкуренции. Внедрение передовых технологий, автоматизация производственных процессов и цифровизация управления становятся ключевыми факторами, необходимыми для повышения качества продукции, сокращения издержек производства и оперативного реагирования на изменения условий рынка [1-3]. Повышение производительности современных машиностроительных предприятий невозможно без проведения комплексного анализа функционирования их производственно-логистических систем (ПЛС), по результатам которого формируются организационно-технологические решения [4]. При этом для выполнения адекватного анализа работы ПЛС необходимо сформировать корректные и непротиворечивые наборы данных, описывающие компоненты рассматриваемой системы, и представленные в формате, необходимом для используемого инструмента анализа [5-7].

Ключевыми элементами управления производственными процессами, обеспечивающими их автоматизацию и контроль, являются информационные системы, внедряемые на различных уровнях управления предприятием. При этом сбор и агрегация данных из различных информационных систем в набор данных, необходимый для проведения ее анализа, становится все более сложной задачей из-за разнообразия форматов, технологий и методов обработки информации [8-9]. Выполнение данно-

го процесса вручную может быть слишком трудоемким процессом, поскольку для анализа могут требоваться большие объемы данных, они могут иметь различный формат, ошибки и противоречивые сведения из различных источников. Поэтому автоматизация процессов агрегации данных ПЛС является актуальной задачей и ее решение позволит сократить временные затраты на сбор и обработку наборов данных, необходимых для проведения анализа ПЛС [10-11].

Для решения описанных задач предлагается разработка интеграционной платформы данных, позволяющей автоматизировать процессы сбора данных ПЛС, сформировать централизованное хранилище данных, обеспечить согласованность данных между различными системами ПЛС, обеспечить контроль и валидацию исходных данных, а также реализовать возможность их экспорта в необходимый формат для проведения дальнейшего анализа.

Разработка структурной модели решения для сбора данных из разнородных информационных систем

Автоматизация процесса сбора данных из различных информационных систем управления ПЛС в предлагаемой интеграционной платформе реализуется за счет создания унифицированного подхода, основанном на использовании гибко настраиваемых интеграционных модулей и загрузки собранных данных в централизованное хранилище. На *рис. 1* показана структурная модель решения

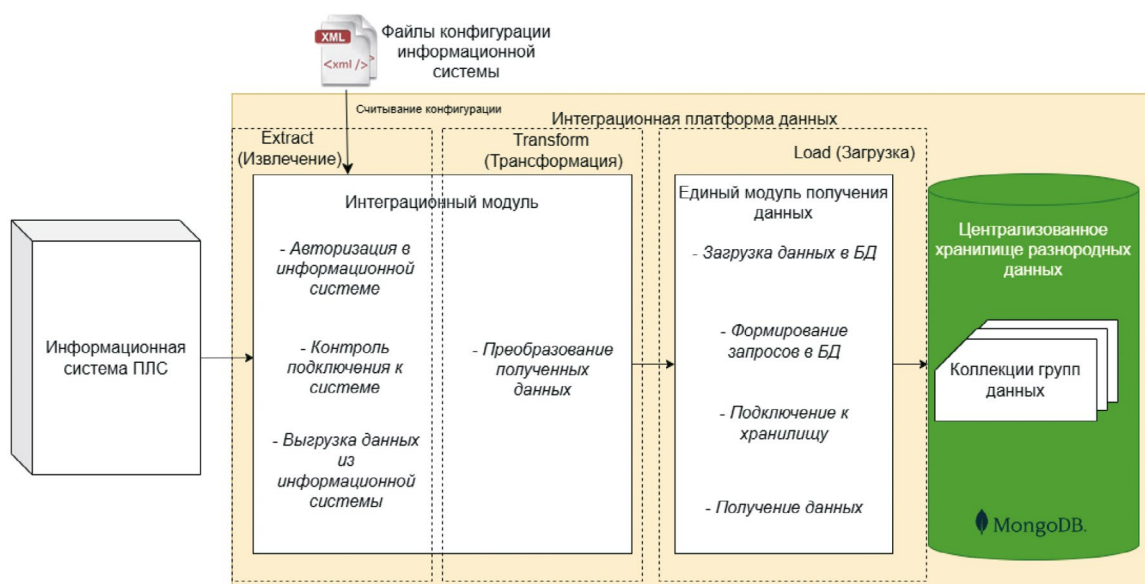


Рис. 1. Структурная модель решения для сбора данных в интеграционной платформе

для сбора данных, реализуемая в интеграционной платформе.

Сбор данных из различных информационных систем реализован с помощью последовательно выполняемых процессов: извлечения, трансформации и загрузки данных.

Взаимодействие с внешними информационными системами реализуется с помощью интеграционных модулей, обеспечивающих поддержку широкого спектра протоколов связи и форматов данных и конфигурируемых под каждый выбранный источник данных. Основным требованием к интеграционным модулям является необходимость поддержки общих протоколов и стандартов передачи данных, таких как: REST, SOAP, OPC UA, MQTT, HTTP, FTP. Помимо этого, интеграционные модули должны поддерживать работу с различными форматами представления данных: CSV, JSON, XML, SQL и др.

Масштабируемость интеграционной платформы заключается в возможности расширения набора интеграционных модулей, реализуемых для взаимодействия с определенной системой. Гибкость интеграционных модулей реализуется за счет их модульной структуры, которая позволяет настраивать процессы и правила сбора данных без необходимости изменения их программной реализации [6]. При изменении структуры данных в одной из информационных систем, используемых в качестве источника данных, в интеграционной платформе реализуется возможность быстрого изменения конфигурации для ее адаптации к новой структуре данных. Файлы конфигурации, разрабатываемые для каждой информационной системы, содержат следующий набор данных:

- данные для подключения к системе;
- данные авторизации;
- формат отправки запросов;
- список настроенных запросов.

Интеграционные модули взаимодействия с внешними информационными системами реализуются в соответствии с типовым интерфейсом и обладают следующим набором функций:

- функция авторизации, предназначенная для установления соединения с информационной системой (данная функция не является обязательной, однако в некоторых случаях выполнение запроса на авторизацию требуется для доступа к системе);
- функция контроля подключения, обеспечивающая проверку доступности соединения

с информационной системой и возможность отправки запросов для извлечения данных;

- выгрузка данных, включая отставку запросов на получение информации из системы и обработку соответствующих ответов.

На следующем этапе полученные из внешних информационных систем данные загружаются в централизованное хранилище, используя единый модуль получения данных, реализующий следующий набор функций:

- функции загрузки данных в базу данных (БД), реализующие выполнение запросов для наполнения единого централизованного хранилища необработанных данных;
- функции формирования запросов в БД, которые на основе полученных данных из информационной системы выполняют создание команд для загрузки данных в единое централизованное хранилище необработанных данных;
- функции для подключения хранилища, которые устанавливают контроль связи с хранилищем необработанных данных;
- функции получения данных, которые используются для формирования единой структуры, предназначенной для последующей загрузки информации в базу данных.

Таким образом реализуется процесс извлечения данных из внешних информационных систем, их трансформация и загрузка в централизованное хранилище разнородных данных, являющееся базовым источником для дальнейшего формирования наборов агрегированных данных, необходимых для анализа ПЛС.

Разработка модели процесса объединения данных в интеграционной платформе

Формирование агрегированных наборов данных, необходимых для выполнения дальнейшего анализа ПЛС, требует предварительной обработки и объединения данных, полученных из различных источников. Данный процесс в интеграционной платформе реализован за счет использования механизмов автоматической проверки данных и настройки правил их объединения.

На рис. 2 представлена модель процесса объединения данных в интеграционной платформе.

Данные, полученные из различных информационных систем, хранятся в централизованном хранилище в виде коллекций групп данных и имеют первоначальные формат и структуру.



Рис. 2. Модель процесса объединения данных в интеграционной платформе

Группы данных, хранящиеся в виде коллекций в нереляционной базе данных, выгружаются в соответствии с выбором пользователя. Пользователь через интерфейс интеграционной платформы задает набор данных, необходимых для выгрузки. Также, данный процесс может быть автоматизирован путем создания конфигурации с описанием правил обработки данных.

В модуле объединения данных производится обработка и валидация данных. Процесс объединения данных направлен на формирование набора данных, необходимых для проведения анализа ПЛС. При необходимости, на первом этапе выполняется обработка данных, заключающаяся в вычислении средних значений, медиан, минимальных и максимальных параметров за определенные временные интервалы. После выполнения этих действий формируется предварительно обработанный набор данных в заданном формате. Однако, на данном этапе возможны ошибки или неполнота данных, что может затруднить их последующий анализ. Проверки на полноту данных выполняются с целью выявить, что во временных рядах данных нет пропущенных интервалов или недостатка обязательных данных. Проверка на корректность данных выполняется для валидации форматов и структур данных, проверка на соответствие необходимым форматам и соответствия диапазонов значений. Проверка на консистентность данных выполняется с целью выявления недостатков при совмещении данных между системами. В результате выполнения данных процессов формируется агрегированный набор данных, который

сохраняется в целевом хранилище.

Для использования полученных агрегированных данных для анализа ПЛС в платформе имеется возможность их преобразования в формат, необходимый для выбранного инструмента анализа. Процесс передачи данных может быть построен несколькими способами: посредством формирования файла исходных данных, с помощью отправки запросов через REST API, наполнения базы данных инструмента анализа ПЛС [12].

В качестве инструментов анализа могут выступать различные системы, реализующие различные методы: аналитический метод расчета, системы производственного планирования, системы имитационного моделирования и др. [13].

Выводы

Для проведения анализа производительности ПЛС машиностроительных предприятий необходимо реализовать сбор и обработку данных, описывающих рассматриваемую систему. Данные, необходимые для анализа, могут храниться в различных информационных системах: системы управления производством (MES), системы управления предприятием (ERP), системы конструкторско-технологической подготовки производства (САПР) и других источниках. Эффективный анализ этих данных может позволить оптимизировать рабочие процессы и повысить производительность ПЛС.

Представленная в статье интеграционная платформа данных реализует функции агрегации данных, что позволяет: автоматизировать процессы сбора данных ПЛС для ее последующего анализа, создать централизованное хранилище данных, обеспечить согласованность данных между различными системами ПЛС, а также обеспечить контроль и валидацию исходных данных.

Разработанная структурная модель решения для сбора данных из разнородных информационных систем реализует свойства гибкости и масштабируемости за счет использования интеграционных модулей, настраиваемых под конкретные источники данных. Представленная модель процессов объединения данных позволяет агрегировать данные из различных систем, выполнять проверку корректности агрегированных данных и сформировать единый набор агрегированных данных, необходимых для использования во внешних инструментах анализа ПЛС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10254, <http://rscf.ru/project/22-79-10254/>. Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Библиографический список

1. Долгов В.А., Рахмилевич Е.Г., Пятнов Ю.В., Подкидышев А.А. Отработка изделий на производственную технологичность при диверсификации машиностроительных предприятий ОПК в условиях развития цифрового производства // Вестник МГТУ «Станкин». – 2018. – № 4 (47). – С. 8–12. – EDN: VRYJKB.
2. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А., Долгов Н.В. Разработка структурной модели цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительных предприятий // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2021. – № 2(137). – С. 43–58. – DOI 10.18698/0236-3941-2021-2-43-58. – EDN TRCNAW.
3. Ягопольский А.Г., Андрюхин Н.Д., Тутукин Д.Г. Имитационное моделирование производственных систем машиностроительных производств // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 11. – С. 254–256. – EDN THNAAN.
4. Долгов В.А., Никишечкин П.А., Архангельский В.Е. и др. Модели управления производственными системами машиностроительных предприятий на основе разработки и использования их цифровых двойников // Моделирование нелинейных процессов и систем: Материалы пятой международной конференции, Москва, 16–20 ноября 2020 года. – М.: ООО «Изд-во «Янус-К», 2021. – С. 171–176. – EDN FJQQNX.
5. Долгов В.А., Никишечкин П.А., Ивашихин С.С. и др. Современные подходы к построению цифровых двойников продуктов, процессов и систем, включая производственно-логистические системы машиностроительных предприятий // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 2. – С. 88–96. – DOI 10.52261/02346206_2023_2_88. – EDN LKUKDS.
6. Nikishechkin P., Akimov A., Nikich A. Practical aspects of building interactive environment for user interfaces development and visualization for monitoring and control of heterogeneous technological processes // AIP Conference Proceedings: International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2021, Sevastopol, 06–10 сентября 2021 года. Vol. 2503. – Sevastopol: American Institute of Physics Inc., 2022. – P. 050087. – DOI 10.1063/5.0101237. – EDN CPLHMZ.
7. Долгов Н. В., Акимов А. А. Применение методов имитационного моделирования для оценки эффективности использования аддитивных технологий печати воском для получения восковых моделей для литья по выплавляемым моделям // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 113–119. – DOI 10.26160/2541-8637-2023-11-113-119. – EDN XARPF1.
8. Никишечкин П.А., Григорьев А.С. Практические аспекты разработки модуля диагностики и контроля режущего инструмента в системе ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин». – 2013. – № 4 (27). – С. 65–70. – EDN: RZBLHD.
9. Никишечкин П.А., Червоннова Н.Ю., Никич А.Н. Подход к построению специализированных портативных терминалов для контроля и управления технологическим оборудованием // Автоматизация в промышленности. – 2018. – № 6. – С. 63–67. – EDN UVIQAX.
10. Dolgov N. V., Akimov A. A., Nikishechkin P. A. Evaluation of the effectiveness of the use of additive wax printing technologies for obtaining wax models for lost-wax casting in custom production based on simulation modeling // E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023), Chelyabinsk, 25–28 апреля 2023 года. Vol. 389. – Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. –

P. 01065. – DOI 10.1051/e3sconf/202338901065. – EDN MZMYJQ.

11. Долгов В.А., Долгов Н.В., Акимов А.А., Прошкина О.С. Особенности расчета технологического цикла сборки изделия с нестабильной длительностью операций в многономенклатурном производстве методами имитационного моделирования и математической статистики // Вестник МГТУ «Станкин». – 2023. – № 1 (64). – С. 34–41. – DOI: 10.47617/2072-3172_2023_1_34. – EDN: ZULTXU.

12. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никисечкин П.А., Ивашихин С.С., Долгов Н.В. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2022. – № 3. – С. 84–99. – DOI: 10.18698/0236-3941-2022-3-84-99

13. Долгов Н.В., Акимов А.А. Применение методов имитационного моделирования для оценки эффективности использования аддитивных технологий печати воском для получения восковых моделей для литья по выплавляемым моделям // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2023. – № 11. – С. 113–119. – DOI 10.26160/2541-8637-2023-11-113-119. – EDN XARPFI.

References

1. Dolgov V.A., Rakhmilevich E.G., Pyatnov Yu.V., Podkidyshev A.A. Testing products for industrial adaptability in the diversification of defense industry machine-building enterprises in the context of the development of digital production. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2018. No. 4 (47). P. 8–12. EDN: VRYJKB.

2. Grigoriev S. N., Dolgov V. A., Nikishechkin P. A., Dolgov N. V. Development of a structural model of the digital twin of the production and logistics system of machine-building enterprises. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. The Mechanical Engineering series*. 2021. No. 2(137). P. 43–58. DOI 10.18698/0236-3941-2021-2-43-58. EDN TRCNAW.

3. Yagopolsky A.G., Andriukhin N.D., Tutukin D.G. Simulation modeling of production systems of machine-building industries. *Innovations and investments*. 2020. No. 11. P. 254–256. EDN THHAH.

4. Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Arkhangel'sky V.E. et al. Management models of production systems of machine-building enterprises based on the development and use of their digital counterparts. Modeling of nonlinear processes and systems: Proceedings of the Fifth International Conference, Moscow, November

16–20, 2020. – Moscow: Publishing House “Janus-K”, 2021. P. 171–176. EDN FJQNX.

5. Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Ivashin S.S. et al. Modern approaches to building digital twins of products, processes and systems, including production and logistics systems of machine-building enterprises. *Problems of mechanical engineering and automation*. 2023. No. 2. P. 88–96. DOI 10.52261/02346206_2023_2_88. EDN LKUKDS.

6. Nikishechkin P., Akimov A., Nikich A. Practical aspects of building interactive environment for user interfaces development and visualization for monitoring and control of heterogeneous technological processes. AIP Conference Proceedings: International conference on modern trends in manufacturing technologies and equipment 2021, Sevastopol, September 06–10, 2021. Vol. 2503. Sevastopol: American Institute of Physics Inc., 2022. P. 050087. DOI 10.1063/5.0101237. EDN CPLHMZ.

7. Dolgov N.V., Akimov A.A. Application of simulation modeling methods to evaluate the effectiveness of using additive wax printing technologies to produce wax models for casting. *Mechatronics, automation and robotics*. 2023. No. 11. P. 113–119. DOI 10.26160/2541-8637-2023-11-113-119. EDN XARPFI.

8. Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S. Practical aspects of developing a module for diagnostics and control of cutting tools in a CNC system. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2013. No. 4 (27). P. 65–70. EDN: RZBLHD.

9. Nikishechkin P.A., Chervonnova N.Yu., Nikich A.N. An approach to the construction of specialized portable terminals for monitoring and controlling technological equipment. *Automation in industry*. 2018. No. 6. P. 63–67. EDN UVIQAX.

10. Dolgov N.V., Akimov A.A., Nikishechkin P.A. Evaluation of the effectiveness of the use of additive wax printing technologies for acquiring wax models for lost-wax casting in custom production based on simulation modeling. E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023), Chelyabinsk, April 25–28, 2023. Vol. 389. Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. P. 01065. DOI 10.1051/e3sconf/202338901065. EDN MZMYJQ.

11. Dolgov V.A., Dolgov N.V., Akimov A.A., Proshkina O.S. Features of calculating the technological cycle of assembling a product with an unstable duration of operations in a multi-nomenclature production by methods of simulation modeling and mathematical statistics. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2023. No. 1 (64). P. 34–41. DOI: 10.47617/2072-3172_2023_1_34. EDN: ZULTXU.

12. Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Dolgov N.V. Simulation modeling of production processes of various types of machine-building industries. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*. 2022. No. 3. P. 84-99. DOI: 10.18698/0236-3941-2022-3-84-99

13. Dolgov N. V., Akimov A. A. Application of simulation modeling methods to evaluate the effectiveness of using additive wax printing technologies to produce wax models for casting. *Mechatronics, automation and robotics*. 2023. No. 11. P. 113–119. DOI 10.26160/2541-8637-2023-11-113-119. EDN XARPF1.

Информация об авторах

Акимов Артём Александрович – аспирант кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
akimov2804@gmail.com

Григорьев Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
s.grigoriev@stankin.ru

Information about the authors

Akimov Artyom Aleksandrovich – postgraduate student at the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”
akimov2804@gmail.com

Grigoriev Sergei Nikolaevich – D.Sc. of Engineering, Full Professor, Head of the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”
s.grigoriev@stankin.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

УДК 621.91.01

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 109–115.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 109–115.

Д.В. Юдин ✉, А.Н. Феофанов

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

✉ Автор для корреспонденции

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИПУСКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДБОРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Аннотация

В данной статье представлена классификация технологических припусков и заданы свойства для их определения. Показано отсутствие на данный момент программного обеспечения для решения задачи подбора режущего инструмента, высокая зависимость от человеческого фактора и квалификации инженерных работников. Показана необходимость автоматизации данного процесса и необходимость сокращения номенклатуры РИ. Сформулированы требования к автоматизированной системе подбора режущего инструмента. Для автоматизации данной задачи, предложен подход, использующий в качестве исходных данных – удаляемый механической обработкой припуск. Предложена классификации припуска и определен набор его технологических характеристик.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, автоматизация разработки технологических процессов, обработка резанием.

Для цитирования: Юдин Д.В., Феофанов А.Н. Классификация припуска для создания автоматизированной системы подбора режущего инструмента // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 109–115.

D.V. Yudin ✉, F.N. Feofanov

MSUT “STANKIN”

✉ Corresponding author

CLASSIFICATION OF ALLOWANCE TO CREATE AN AUTOMATED CUTTING TOOL SELECTION SYSTEM

Abstract

This article presents the classification of technological allowances and sets the properties for their determination. It is shown that at present there is no software for solving the problem of cutting tool selection, high dependence on the human factor and qualification of engineers. The necessity of automation of this process and the need to reduce the nomenclature of RI is shown. Requirements to the automated system of cutting tool selection are formulated. To automate this task, an approach using as input data the allowance removed by machining is proposed. The classification of the allowance is proposed and a set of its technological characteristics is defined.

Keywords: technological preparation of production, automation of technological process development, machining by cutting.

For citation: Yudin D.V., Feofanov F.N. Classification of allowance to create an automated cutting tool selection system. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 109–115. (In Russian)

Введение

Одним из недостатков современного машиностроительного производства является избыточное разнообразие средств технологического оснащения. Оно заключается в том, что на предприятиях при обработке близких конструктивно или технологически деталей используется различный инструмент и оснастка, а также различное технологическое оборудование и методы обработки [1].

Для сокращения средств технологического оснащения применяют такие методы технологической унификации как типовая или групповая технология [2], но у данных методов есть недостатки, которые не позволяют их эффективно реализовать, особенно в мелкосерийном производстве.

Одним из составляющих технологического обеспечения является режущий инструмент (РИ), который используется практически во всех методах механической обработки. Проблемы инструментального обеспечения особенно остро проявляются на предприятиях, имеющих множество разнообразного металлорежущего оборудования, многое из которого оснащается магазинами на десятки инструментов. Такие оборудование требуют для своей работы заказов на сотни наименований различного РИ, потребное количество которого в год может исчисляться тысячами. Статистические данные по России показывают, что доля покупного инструмента достигает 80% в системе инструментального обеспечения предприятия [3], следствием чего затраты на поддержание необходимого количества инструмента в производстве колеблются от 15 до 40% общей суммы оборотных средств машиностроительного предприятия [4].

Выбор РИ также сильно влияет на эффективность использования металлорежущего оборудования, обладающего высокой стоимостью, в связи с чем необходимо применять РИ, удовлетворяющий следующим требованиям:

- обладать стабильными режущими свойствами;
- удовлетворительно формировать и отводить стружку;
- обеспечивать заданную точность обработки;
- обладать универсальностью, чтобы его можно было применять для обработки типовых поверхностей различных деталей на разных моделях станков;
- быть быстросменным при переналадке на другую обрабатываемую деталь или замене инструмента;

- обеспечивать возможность предварительной наладки на размер вне станка.

Таким образом обеспечение оптимального выбора РИ для обработки изделий является сложной многокритериальной задачей [5], и требуются специальные научно обоснованного подхода к подбору и унификации. Несмотря на данные обстоятельства, выбор РИ происходит, как правило, на основе личного или производственного опыта, а также на основе рекламных материалов или совета продавцов инструмента.

В идеальных производственных условиях определение инструмента должно происходить в несколько этапов:

1. По заданным условиям обработки определяются требуемые параметры РИ;
2. По требуемым параметрам подбирается подходящий РИ.

Первый этап сопряжен с большим количеством входных параметров. Ввиду отсутствия прямых закономерностей – решение связано с более творческой работой и наличием множества вариантов решений, проверить которые ввиду большой трудоемкости, длительности и их стоимости не представляется возможным в реальных условиях.

Для решения задачи по подбору РИ и его унификации используется специализированное программное обеспечение. На данный момент разработаны различные программные комплексы, облегчающие труд инженера в процессе выбора РИ, среди которых можно выделить следующие:

1. Sandvic CoroGuide. Позволяет производить расчет режимов резания, рассчитывает шероховатость и трудоемкость обработки на основе введенных данных.

2. SECO CUT. Формирует рекомендации по режимам резания для различных методов обработки. Для этого в систему необходимо последовательно параметры РИ, а также группу обрабатываемого материала. Система рассчитывает теоретическую шероховатость поверхности, обработанной выбранным инструментом.

3. ISCAR ELECTRONIC CATALOG. Представляет собой электронную версию каталога инструмента и обеспечивает выбор инструмента для точения, нарезания резьбы, фрезерования, растачивания, развертывания, сверления и других операций.

4. OMEGA Production. Система включает в себя модули управления инженерными данными и технического документооборота, образующие встроенный PDM-модуль. В данной системе реализован алгоритм подбора РИ фирмы Sandvic Coroman

включающий стадии подбора характеристик оснастки и расчет режимов работы оборудования.

5. САПР ТП Вертикаль. Имеет собственную систему расчета режимов резания на основе [8]. Рекомендуемые нормативы режимов резания позволяют выбрать подачу, глубину резания, скорость резания в зависимости от точности и качества обрабатываемых поверхностей, заданного эксплуатационного ресурса и необходимой производительности.

Анализ возможностей данных систем позволяет сделать следующие выводы:

1. В основном ассортимент РИ представлен производителем – разработчиком данной системы;
2. Отсутствует возможность добавлять свой инструмент и обновлять базу данных и уточнять технологические параметры самостоятельно;
3. Данные системы по сути являются электронными каталогами производителей инструмента;
4. Отсутствует интеграция с CAD, CAM, CAPP и другими автоматизированными системами, что сказывается на качестве и скорости подбора инструмента;
5. Не маловажным фактором является то, что иностранные системы вместе с РИ перестали быть доступными в РФ.

В реальных условиях производственная практика показывает, что подбор РИ ведется методом ручного поиска из базы данных (БД). Иерархия в БД строится на основе таких признаков как фирма производитель или ГОСТ на режущий инструмент. Данное обстоятельство облегчает введение базы данных, но приводит к таким последствиям как:

- увеличение время на поиск РИ;
- избыточное множество РИ;
- дублирование информации;
- отсутствует возможность оперативного отслеживания изменений в БД.

На основе вышесказанного, можно констатировать, что на данный момент отсутствуют системы позволяющие производить поиск инструмента без непосредственного участия человека.

Данное обстоятельство во многом связано с отсутствием выявленных взаимосвязей между технологическими операциями и РИ, так как не определены и не формализованы параметры, на основе которых можно построить математическую модель выбора РИ [6].

В данной работе для создание автоматизированной системы подбора РИ (АСП РИ) предлагается выполнение следующих этапов:

1. Задание математической модели;
2. Определение универсальных данных и их формализация;

3. Разработка алгоритма подбора и оптимизации выбора РИ.

В качестве математической модели, используемой для автоматизации подбора инструмента предлагается использовать следующую функцию (1):

$$F(p_1, p_2 \dots p_n) = \{I_1, I_2 \dots I_n\}, \quad (1)$$

где F – функция подбора инструмента; p – параметры ТП, I – РИ.

Для функционирования математической модели параметры должны быть универсальны для всех видов обработки резанием, при этом их количество должно быть ограничено, и они должны быть извлечены непосредственно из ТП. Минимальная часть ТП, для которого определяется РИ является технологический переход, так как согласно ГОСТ 3.1109-82 «ЕСТД. Термины и определения основных понятий»: технологический переход – это законченная часть технологической операции, выполняемой одними и теми же средствами технологического оснащения при постоянных технологических режимах и установке. Каждый технологический переход при обработке резанием характеризуется промежуточным припуском, т.е. припуском, удаляемым при выполнении одного перехода. Следовательно, классификация припусков, позволит построить на ее основе функциональную зависимость (1).

К свойствам припуска относятся: форма, размеры, твердость, шероховатость [7]. Данные параметры, кроме геометрической формы (ГФ), имеют цифровое представление, т.е. формализованы. Для формализации ГФ необходимо проанализировать ее частные случаи в зависимости от типа РИ и кинематической схемы резания. Результаты анализа наиболее часто применяемых РИ приведены в *табл. 1*.

На основе *табл. 1* можно сделать вывод что припуск по ГФ подразделяется на две группы: цилиндрической формы (ЦФ) и призматической формы (ПФ).

Необходимо проанализировать наличие дополнительных факторов, которые могут влиять или ограничивать выбор РИ. Для этого были рассмотрены следующие частные случаи:

1. Припуск может иметь как свободный доступ при обработке или быть ограниченным телом детали. Определим данный параметр как количество сопрягаемых поверхностей между припуском и деталью. На *рис. 1 и 2* показаны случаи, при котором припуск имеет в первом варианте сопряжение с одной, во втором – с тремя поверхностями детали.

Таблица 1

Анализ ГФ припуска в зависимости от РИ

№	РИ	Главное движение резания	Главное движение подачи	Форма припуска
1	Резец	Вращательное	Прямолинейное	Цилиндрическая
2	Фреза	Вращательное	Прямолинейное	Призматическая
3	Сверло	Вращательное	Прямолинейное	Цилиндрическая
4	Шлифовальный круг	Вращательное	Прямолинейное (плоское шлифование)	Призматическая
5		Вращательное	Вращательное + прямолинейное (круглое шлифование)	Цилиндрическая

При выборе токарного резца, данный параметр будет существенно влиять на геометрию режущей части.

2. На выбор РИ накладывает ограничение такой параметр припуска как: не параллельность плоскости припуска относительно оси вращения детали или базовой поверхности. Примеры для припусков ПФ и ЦФ представлены на рис. 3, 4. Угол α влияет на геометрию режущей и вспомогательных поверхностей РИ в зависимости от метода обработки.

3. Дополнительным фактором, влияющим на РИ, являются ограничение на подход инструмента не-

посредственно к зоне обработки, т.е. размер выступающей части детали или оснастки над припуском. Данный параметр влияет на требование к общей длине инструмента. Пример данного параметра «L» показан на рис. 5.

На основе приведенных частных случаев разработана сводная табл. 2. В нее также добавлены общие параметры как материал детали и метод обработки. Приведенные параметры будут использованы при построение классификации припусков с целью ее использования при для разработки АСП РИ.

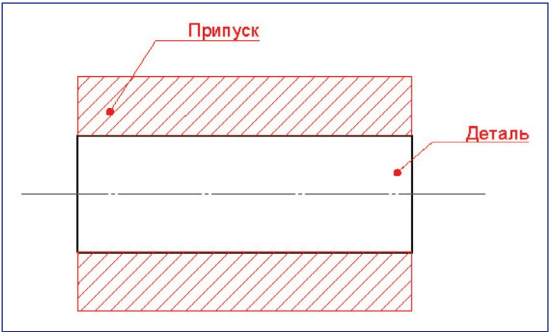


Рис. 1. Припуск и деталь имеют одну сопрягаемую плоскость

Источник: составлено авторами на основании анализа частных случаев припусков, удаляемых при обработке резанием

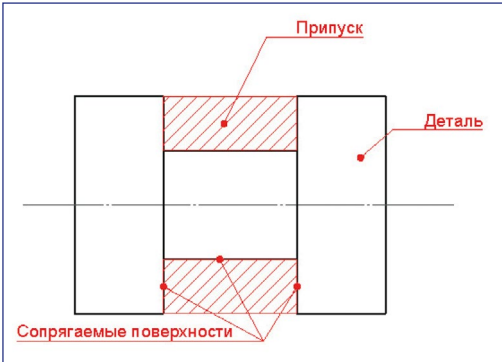


Рис. 2. Припуск и деталь имеют сопряжение по трем поверхностям

Источник: составлено авторами на основании анализа частных случаев припусков, удаляемых при обработке резанием

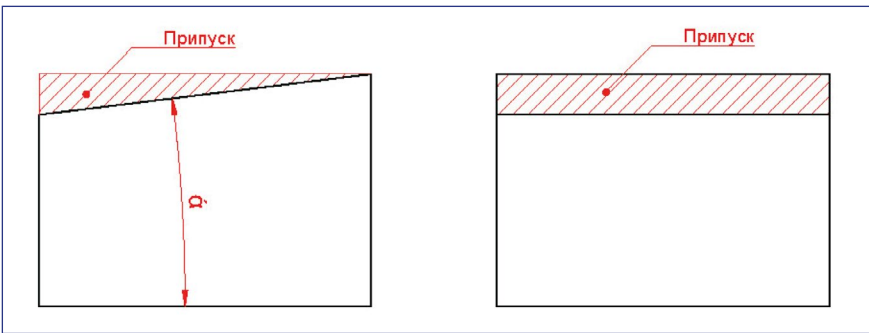


Рис. 3. Угол между плоскостью припуска и базовой плоскостью

Источник: составлено авторами на основании анализа частных случаев припусков, удаляемых при обработке резанием

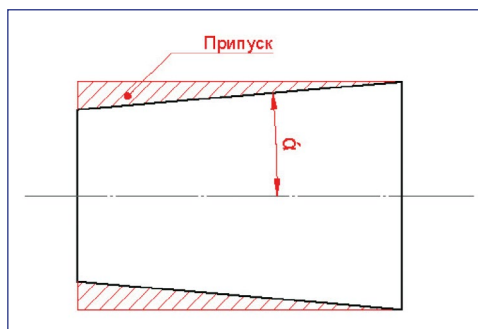


Рис. 4. Угол между плоскостью припуска и осью вращения детали

Источник: составлено авторами на основании анализа частных случаев припусков, удаляемых при обработке резанием

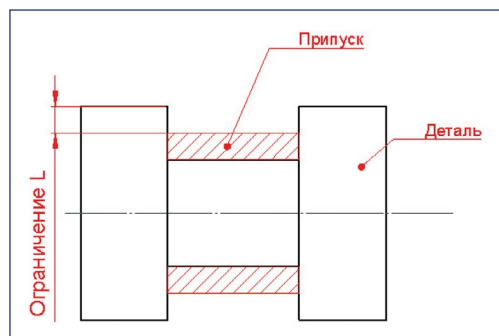


Рис. 5. Ограничение на подход инструмента L

Источник: составлено авторами на основании анализа частных случаев припусков, удаляемых при обработке резанием

Таблица 2

Параметры классификации припусков при механической обработке

№	Параметр	Значение
1	Геометрическая форма	ЦФ / ГФ
2	Размеры	Габаритные размеры, мм
3	Твердость	НВ / HRA
4	Шероховатость	Ra
5	Количество сопрягаемых поверхностей	От 1 до 5
6	Угловое отклонение	Угол α
7	Ограничение на подход инструмента	L, мм
8	Материал	Классификация в соответствии с ISO
9	Метод обработки	Токарный / фрезерный и т.п.

Источник: составлено авторами на основании приведенных частных случаев припуска

В данной классификации приведены параметры, которые будут использованы для вычисления функции (1), в результате вычисления которой могут быть получены следующие варианты:

1. Отсутствует РИ с требуемыми технологическими характеристиками. Необходимо либо расширять БД соответствующим РИ, либо корректировать ТП и удаляемый припуск на конкретном переходе.

2. Определен только один инструмент, подходящий для данного перехода, который будет использоваться при обработке детали.

3. Определены несколько инструментов, подходящих для данного перехода. Это связано с тем, что практически любой припуск, не обладающий уникальными характеристиками возможно удалять различным РИ. Для наиболее подходящего варианта в конкретных производственных условиях не-

обходимо применение этапа оптимизации. Для его реализации предлагается следующая функция (2):

$$S(F(p_1, p_2 \dots p_n); K) = I, \quad (2)$$

где $S()$ – функция оптимизации; K – параметры оптимизации.

Набор параметров оптимизации включает:

- ограничения на использование РИ;
- критерий оптимизации (минимизация времени или стоимости обработки).

На рис. 6 представлен алгоритм функционирования АСП РИ.

Представленный алгоритм позволит подобрать в автоматизированном режиме наиболее подходящий в заданных условиях инструмент. При этом из данного алгоритма следует, что для его функ-

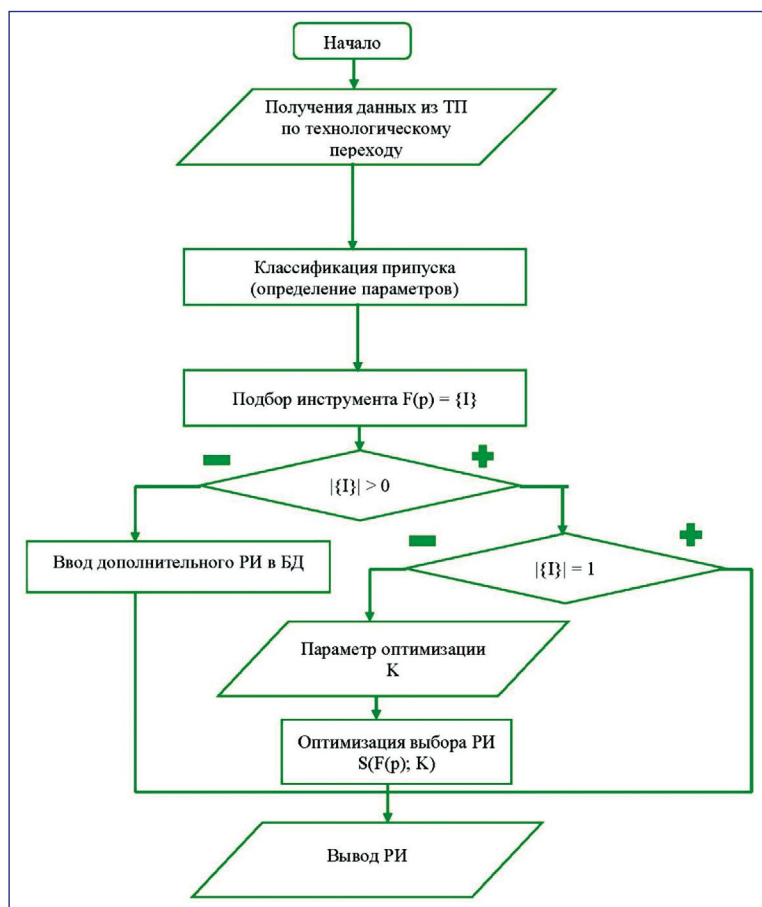


Рис. 6. Алгоритм АСП РИ

Источник: составлено авторами на основании анализа различных вариантов решения функции автоматического подбора режущего инструмента

ционирования необходимо, чтобы АСП РИ взаимодействовала с БД РИ для поиска инструмента, с производственной системой (MES) для получения параметров оптимизации и с системой разработки ТП (CAPP) для получения исходных данных.

Выводы

В данной работе показана возможность использование классификации технологических припусков как основы автоматизированной системы подбора режущего инструмента. Данная система позволит без участия человека на основе данных из ТП производить подбор РИ, а учет параметров оптимизации позволит делать выбор исходя из текущих производственных условий. Реализация данного подхода потребует дальнейшего методического обеспечения, в части определение взаимосвязи между группами технологическими параметрами припусков и применяемым инструментом, формирование структуры БД РИ и моделирование взаимосвязей между автоматизированными системами, используемыми при подготовке производства.

Библиографический список

1. Базров Б.М. Системный подход применения видов технологии // Научные технологии машиностроения. – 2022. – № 7 (133). – С. 27–32.
2. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. Т. 1. Организация группового производства. – Л.: Машиностроение, 1983. – 407 с.
3. Крылов Е.Г., Козловцева Н.В., Литвинцева В.В., Дун Ю.Ю. Качество функционирования режущего инструмента. Способы и средства обеспечения // Перспективы развития информационных технологий. – 2014. – № 17.
4. Фатхутдинов Р.А. Организация производства: учебник. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 544 с.
5. The problems of rational selection of tool management systems on CNC machines / E.G. Krylov, N.V. Kozlovtsseva, A.B. Mishkevich & V.V. Litvinzeva // Technical Sciences: Modern Issues and Development Prospects: International Conference, December 10, 2013.
6. Юдин Д.В., Феофанов А.Н. Формализация припуска, припуска, удаляемого при обработке реза-

нием, для решения задачи автоматизации разработки технологического процесса // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2024. – № 3. (25). – С. 27-33.

7. ГОСТ 3.1109-82 «ЕСТД. Термины и определения основных понятий»: дата введения 1983-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 15 с.

8. Лонтев А.Д., Гуцин И.Ф., Батыев В.А. и др. Общемашиностроительные нормативы режимов резания / В 2 т. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1991. – 640 с.

References

1. Bazrov B.M. A systematic approach to the application of types of technology. *High-tech technologies of mechanical engineering*. 2022. № 7 (133). P. 27–32.

2. Mitrofanov S.P. Group technology of machine-building production. Vol. 1. Organization of group production. L.: Mashinostroenie, 1983– 407 p.

3. Krylov E.G., Kozlovtsseva N.V., Litvintseva V.V., Dong Yu.Y. The quality of the cutting tool functioning.

Ways and means of ensuring. *Prospects for the development of information technology*. 2014. No. 17.

4. Fatkhutdinov R.A. Organization of production: textbook. Moscow: INFRA-M, 2007. 544 p.

5. The problems of rational selection of tool management systems on CNC machines / E.G. Krylov, N.V. Kozlovtsseva, A.B. Mishkevich & V.V. Litvinzeva // Technical Sciences: Modern Issues and Development Prospects: International Conference, December 10, 2013.

6. Yudin D.V., Feofanov A.N. Formalization of an allowance, an allowance removed during cutting, to solve the problem of automating the development of a technological process. *Automation and modeling in design and management*. 2024. № 3. (25). P. 27–33.

7. GOST 3.1109-82 “ESTD. Terms and definitions of basic concepts”: date of introduction 1983-01-01. – Moscow: Standartinform, 2012. – 15 p.

8. Lontev A.D., Guschin I.F., Batuev V.A. and others. General machine-building standards of cutting modes. In 2 volumes. Vol. 2. M.: Mashinostroenie, 1991. 640 p.

Информация об авторах

Юдин Денис Владимирович – аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
udindv@mail.ru

Феофанов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
feofanov.fan1@yandex.ru

Information about the authors

Yudin Denis Vladimirovich – postgraduate student at the sub-department of “Automated Information Processing and Management Systems”, MSUT “STANKIN”
udindv@mail.ru

Feofanov Aleksandr Nikolaevich – D.Sc. of Engineering, Full Professor, Professor at the sub-department of “Engineering Graphics”, MSUT “STANKIN”
feofanov.fan1@yandex.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Научная статья

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 116–125.

УДК 681.5.08: 621.452.3

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 116–125.

*Е.А. Алексеев¹✉, А.Н. Ломанов²*¹ ПАО «ОДК-Сатурн»; ² ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

✉ Автор для корреспонденции

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СВЕЧЕНИЯМИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СВЕЧЕНИЙ ПРИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОМ КОНТРОЛЕ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация

В основе контрольных операций при осмотре поверхностей лопатки на наличие дефектов под УФ-светом лежит использование машинного зрения. При реализации технологии автоматизированного контроля необходимо решить несколько ключевых задач: получение пакета инспекционных изображений сложно профильного объекта контроля (авиационной лопатки), определение реальных параметров (размеров) свечений для единичных и групповых дефектов, формирование экспертных рекомендаций (цифрового следа) по определению наличия дефектов на inspectируемых поверхностях для оператора или автоматизированных систем.

Представлена методика определения расстояния между свечениями, устранения их дублирования и классификация свечений при люминесцентном контроле лопаток газотурбинных двигателей (ГТД). В основе классификации лежит сравнение полученных индикаций с эталонными фотошаблонами. Приведены этапы анализа классификационных признаков и алгоритмы их реализации.

Ключевые слова: машинное зрение, люминесцентный контроль, классификация свечений, методика анализа, алгоритмы классификации.

Для цитирования: Алексеев Е.А., Ломанов А.Н. Разработка методики определения расстояния между свечениями и классификация свечений при люминесцентном контроле лопаток газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 116–125.

*Е.А. Alekseev¹✉, A.N. Lomanov²*¹ PJSC “UEC-Saturn”; ² Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov

✉ Corresponding author

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE DISTANCE BETWEEN GLOWS AND CLASSIFICATION OF GLOWS DURING LUMINESCENT TESTING OF GAS TURBINE ENGINE BLADES

Abstract

Machine vision is the basis of control operations during inspection of blade surfaces for defects under UV light. When implementing automated control technology, it is necessary to solve several key problems: obtaining a package of inspection images of a complex profile control object (aircraft blade), determining

the real parameters (sizes) of glows for single and group defects, forming expert recommendations (digital trace) for determining the presence of defects on inspected surfaces for the operator or automated systems. A method is presented for determining the distance between glows, eliminating their duplication, and classifying glows during luminescent testing of gas turbine engine blades. The classification is based on a comparison of the obtained indications with reference photomasks. The stages of analysis of classification characteristics and algorithms for their implementation are given.

Keywords: computer vision, luminescent control, classification of luminescence, analysis technique, classification algorithms.

For citation: E.A. Alekseev, A.N. Lomanov. Development of a method for determining the distance between glows and classification of glows during luminescent testing of gas turbine engine blades. *Vestnik MSUT "Stankin"*. 2025. No 1 (72). P. 116–125. (In Russian)

Введение

Автоматизация оптического неразрушающего контроля за счет применения машинного зрения связана с необходимостью быстрого анализа информации [1]. При выполнении анализа полученных изображений необходимо классифицировать свечения, при этом не потерять значимую информацию. Вопросам анализа изображений и классификации свечений посвящены работы [2, 3, 4 и др.]. Так в работах [4, 5, 6] представлены разработанные методы и алгоритмы цифровой обработки и распознавания дефектоскопической информации. Использование интеллектуальных методов анализа и классификации, в том числе на основе нейронных сетей, представлено в работах [7, 8, 9, 10]. Однако сложности анализа дефектоскопической информации на поверхностях лопаток турбины в приведенных работах не отражены.

Основная часть

Для того, чтобы на изображениях захватить всю поверхность лопатки, необходимо снимать её под разными ракурсами, а так как лопатка имеет поверхность сложной формы, то на некоторых снимках одни и те же свечения могут дублироваться. Одним из вопросов анализа является исключение дубликатов из списка свечений. При этом используется разработанный алгоритм, который позволяет вычислять минимальное расстояние между всеми парами свечений.

Сначала определяется минимальное расстояние между точками отдельных свечений, в результате чего вычисляется кросс-таблица расстояний. На основе кросс-таблицы определяются кандидаты на дублирование. Если расстояние между двумя свечениями меньше заданного порога (используется значение 0,3 мм), то одно из двух свечений удаля-

ется. Выбор свечения для удаления выполняется исходя из формулы

$$(1 - k) \cdot S + k \cdot A \leq 0,3, \quad (1)$$

где k – коэффициент значимости угла или площади при сравнении (коэффициент принимает значение от 0 до 1, если значение больше 0,5, то предпочтение отдаётся отношению площадей, если меньше 0,5 – отношению углов); S – отношение площадей сравниваемых свечений; A – отношение углов (угол относительно камеры) сравниваемых свечений.

Данная формула представляет сравнение свечений по площади и по углу нормали относительно камеры. В зависимости от значения в результате выбирается то или иное свечение.

Полученная кросс-таблица, а также все оригинальные свечения, в дальнейшем используются для их классификации.

В основе классификации лежит процедура сравнения полученного свечения с эталонными. Не все свечения, которые детектируются на поверхности лопатки, являются дефектами, поэтому следует выполнять классификацию каждого из них. Свечение признаётся дефектом в зависимости от его формы, размеров, положения в определённой зоне лопатки, а также положения относительно остальных свечений.

Все дефекты можно разделить на 3 основные группы:

- единичная индикация;
- объединение единичных индикаций;
- групповая индикация.

Для анализа лопатка визуально разбивается на 3 зоны, в каждой из которых действуют свои критерии годности для тех или иных типов свечений. Пример разделения лопатки на зоны представлен на рис. 1.

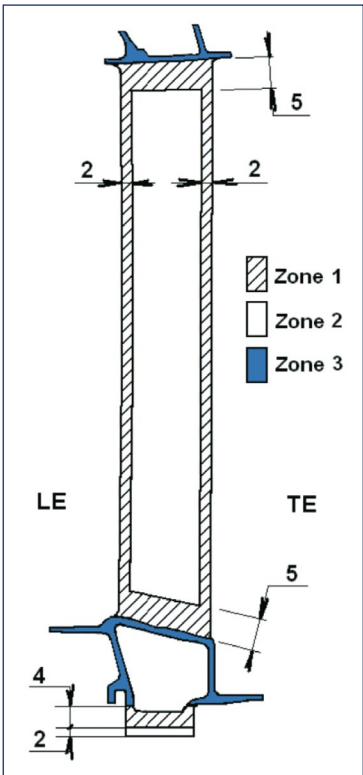


Рис. 1. Пример разделения лопатки на зоны

Определение единичных индикаций

Единичная индикация представляет собой обособленное свечение недопустимого размера и/или формы. Описание типов единичных индикаций представлено в табл. 1.

Определение объединений единичных индикаций

Объединение единичных индикаций представляет собой небольшое скопление единичных индикаций, расположенных на одной поверхности на очень маленьком расстоянии относительно друг друга. Описание допустимых параметров объединений единичных индикаций представлено в табл. 2. Если свечения образуют объединение, то оно в дальнейшем классифицируется по критериям единичных индикаций, а в качестве размеров принимается общий размер всего объединения.

Определение групповых индикаций

Групповая индикация представляет собой скопление индикаций, расположенных на одной поверхности на маленьком расстоянии друг от друга в определённой области, а также соответствующих фотошаблону. Групповые индикации делятся на 6 классов. В данной работе проводится анализ 2, 3 и 4 ступеней ГТД LEAP-1B, поэтому рассматриваться будут только первые 3 класса, а именно: класс 10 (фотошаблоны, представлен на рис. 2), класс 20 (фотошаблоны, представлен на рис. 3), класс 30 (фотошаблоны, представлен на рис. 4). Внутри класса групповая индикация делится по форме на круглую и овальную. Критерии годности лопатки с точки зрения групповых индикаций представлены в табл. 3.

Таблица 1

Описание допустимых параметров единичных индикаций

Наименование	Параметры	Примечание
Единичная индикация недопустимого размера	Зона 1: максимальный размер свечения не должен превышать 0,5 мм	Если свечение превышает допустимый порог по размеру, то оно признаётся дефектом.
	Зона 2: максимальный размер свечения не должен превышать 1 мм	
	Зона 3: максимальный размер свечения не должен превышать 1,5 мм	
Линейная индикация	Длина дефекта превышает его ширину в 4 раза и более	Независимо от зоны данное свечение признаётся дефектом



Рис. 2. Фотошаблон представлен групповой индикации класса 10

Таблица 2

Описание допустимых параметров объединений единичных индикаций

Наименование	Параметры	Примечание
Объединение по области	Зона 1: минимальный размер свечения в объединении должен превышать или быть равен 0,3 мм	Если свечение меньше допустимого порога по размеру, то оно игнорируется при объединении
	Зона 2: минимальный размер свечения в объединении должен превышать или быть равен 0,5 мм	
	Зона 3: минимальный размер свечения в объединении должен превышать или быть равен 1 мм	
	Независимо от зоны: два свечения объединяются, если расстояние между ними меньше, чем двойной размер наибольшего из свечений	
Противолежашие индикации	Два свечения находятся на противоположных сторонах одной поверхности	Данный тип индикации является недопустим для лопатки
Объединение в линию	Независимо от зоны: два свечения объединяются если расстояние между ними больше двойного размера наибольшего из свечений, но меньше четверного размера наибольшего из свечений	Независимо от зоны данное свечение признаётся дефектом
	Независимо от зоны: объединение происходит если дефекты визуально образуют линию, без резкий переломов или загибов	
	Независимо от зоны: минимальное количество свечений, которое учитывается при объединении равняется 3	
	Независимо от зоны: при формировании данного типа объединения размеры не учитываются	

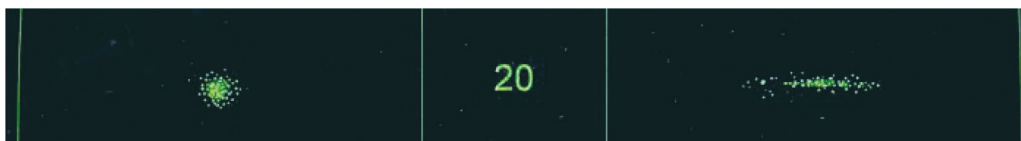


Рис. 3. Фотошаблон представлен групповой индикации класса 20



Рис. 4. Фотошаблон представлен групповой индикации класса 30

Таблица 3

Критерии годности лопатки с точки зрения групповых индикаций

Зоны	1 на пере лопатки	1 на замке	2 на пере лопатки	2 вне пера лопатки	3
Критерии	Отсутствие	Класс 10	Класс 10	Класс 20	Класс 30 или 20/10
Количество	Нет	≤2	1	≤2	≤2
Расстояние	Не применяется	≥10 мм	–	≥10 мм	≥10 мм

Примечание.

На пере лопатки допускается:

- 1 индикация класса 20 или класса 10/20 в радиусе перехода от пера лопатки к гребешку.
- 1 индикация класса 20 или класса 10/20 в радиусе перехода от пера лопатки к бандажной полке.

На бандажной полке допускается 1 индикация класса 30/20 на выходных крылышках.

После того, как сделаны все снимки поверхности лопатки, а также обнаружены и обсчитаны все свечения и удалены дубликаты, они объединяются в один массив, и выполняется классификация свечений. Для этого массив свечений поочередно пропускается через функции поиска дефектов в следующей последовательности:

- поиск групповых индикаций;
- поиск единичных индикаций;
- поиск противоположащих индикаций;
- поиск индикаций, объединённых по области;
- поиск индикаций, объединённых в линию.

Этап 1. Поиск групповых индикаций

Для поиска групповых индикаций используется алгоритм кластеризации данных *DBSCAN*. Все дефекты объединяются в кластер, если имеют хотя бы двух соседей на расстоянии до 1.5 миллиметров. Коэффициенты определены эмпирически.

Перед кластеризацией выполняется подготовка данных. Свечения, находящиеся на разных поверхностях (например, противоположащие) могут иметь маленькое расстояние между друг другом, поэтому расстояние между ними намеренно увеличивается, чтобы они не попали в одну группу. Для того, чтобы определить находятся они на разных поверхностях или нет, сравниваются их вектора нормали. Если угол между векторами больше 135 градусов, то считается, что свечения противоположащие.

Если был найден хотя бы один кластер, определяется, принадлежит ли он хотя бы одному классу и, если принадлежит, то какому. Для этого рассчитываются характеристики кластеров, такие как: длина, ширина, зона, форма, средний вектор

нормали. Затем каждый кластер проходит проверку на принадлежность классу по критериям, представленным в *табл. 4*.

Если хотя бы один кластер был определён как групповая индикация, то все свечения, входящие в него, не анализируют на следующих этапах классификации. Если было найдено более одной групповой индикации, и они находятся в одной зоне, то рассчитывается расстояние между ними, а также подсчитывается количество индикаций в каждой из зон.

После определения всех этих параметров выполняется проверка, являются ли обнаруженные групповые индикации недопустимыми для лопатки в соответствии с *табл. 3*.

Этап 2. Поиск единичных индикаций

Исходя из того, что размеры всех свечений заранее посчитаны, поиск единичных индикаций сводится к проверке их допустимости для лопатки по критериям, которые описаны в *табл. 1*. Свечения, определённые как недопустимые, не анализируются на дальнейших этапах классификации

Этап 3. Поиск противоположащих индикаций

Поиск данного типа дефектов выполняется в 2 этапа:

- сортировка свечений в порядке уменьшения размера;
- поиск противоположащих индикаций.

Сортировка выполняется по заранее посчитаным размерам свечений и производится для упрощения дальнейших вычислений.

Таблица 4

Критерии принадлежности кластера свечений к групповой индикации

Класс	Максимальный размер круглой индикации	Максимальный размер овальной индикации	Минимальное количество свечений
Не группа	3 мм	Длина: 4 мм Ширина: 3 мм	0 шт.
Класс 10	5 мм	Длина: 10 мм Ширина: 7 мм	7 шт.
Класс	Максимальный размер круглой индикации	Максимальный размер овальной индикации	Минимальное количество свечений
Класс 20	7 мм	Длина: 17 мм Ширина: 9 мм	9 шт.
Класс 30	9 мм	Длина: 24 мм Ширина: 13 мм	11 шт.

Для поиска противолежащих индикаций все свечения попарно сравниваются друг с другом. Для определения того, являются ли свечения противолежащими, сначала выполняется сравнение их векторов нормали, как упоминалось ранее. Если они находятся на разных поверхностях, сначала проверяется расстояние между ними, которое не должно превышать 3 мм, а затем проверяется, находятся ли они напротив друг друга. Для этого выполняются следующие действия:

- определяется уравнение плоскости каждого свечения;
- центральная точка каждого свечения проецируется на плоскость другого свечения;
- если спроецированная точка одного свечения попала в область другого свечения, то дефекты считаются противоположными.

Если дефекты определены как противоположные, то они не анализируются на дальнейших этапах классификации.

Этап 4. Поиск индикаций, объединённых по области

Поиск данного типа дефектов выполняется в 3 этапа:

- поиск соседних индикаций;
- объединение соседних индикаций в группы;
- проверка допустимости объединений для лопатки.

Блок-схема алгоритм работы поиска представлена на рис. 5.

Для анализа используется отсортированный массив свечений, из которого исключаются свечения малого размера в соответствии с табл. 2.

Для определения соседства свечения попарно сравниваются. Сначала определяется принадлежность свечений одной поверхности. Для этого определяется угол между векторами нормали свечений. Свечения определяются на одной поверхности, если угол между векторами нормали меньше либо равен 45° . Если свечения лежат на одной поверхности, определяется соседство по расстоянию между ними в соответствии с табл. 2. Для каждого свечения записывается его сосед.

После анализа всех пар выполняется объединение соседствующих свечений с расчётом параметров этих объединений. Каждое объединение проверяется на допустимость для лопатки в соответствии с табл. 2.

Все дефекты, попавшие в объединения, не анализируются на дальнейших этапах классификации.

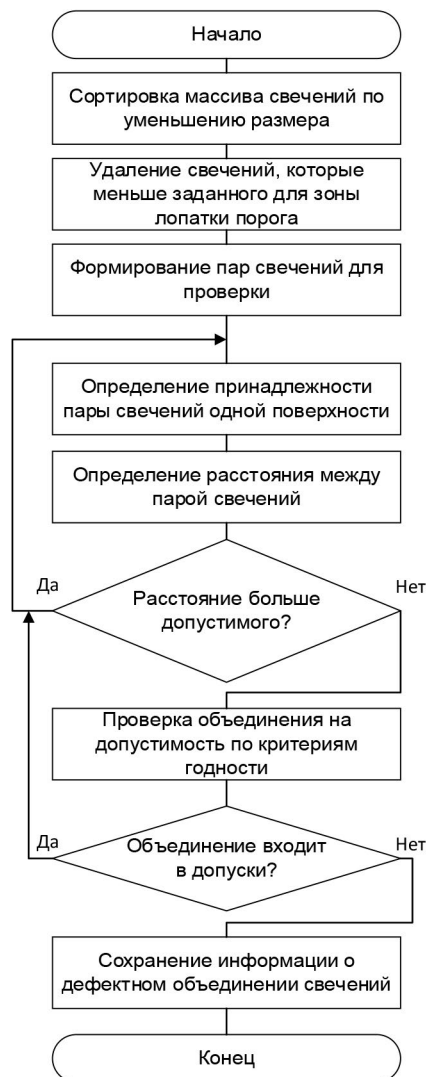


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы поиска объединений

Этап 5. Поиск индикаций, объединённых в линию

На вход данного алгоритма подаётся отсортированный (по уменьшению размера) массив с оставшимися свечениями.

Блок-схема алгоритм работы поиска представлена на рис. 6.

Все свечения поочерёдно попарно сравниваются. Выбирается пара свечений и определяется, находятся ли они на одной поверхности, а затем находятся ли они на расстоянии друг от друга в соответствии с табл. 2. Если условия выполняются, то это инициирует поиск следующего свечения, которое может попасть в линию. Для этого сначала определяется направление линии, которое является вектором между центральными точками свечений. Следующее свечение должно также соответствовать критериям по расстоянию

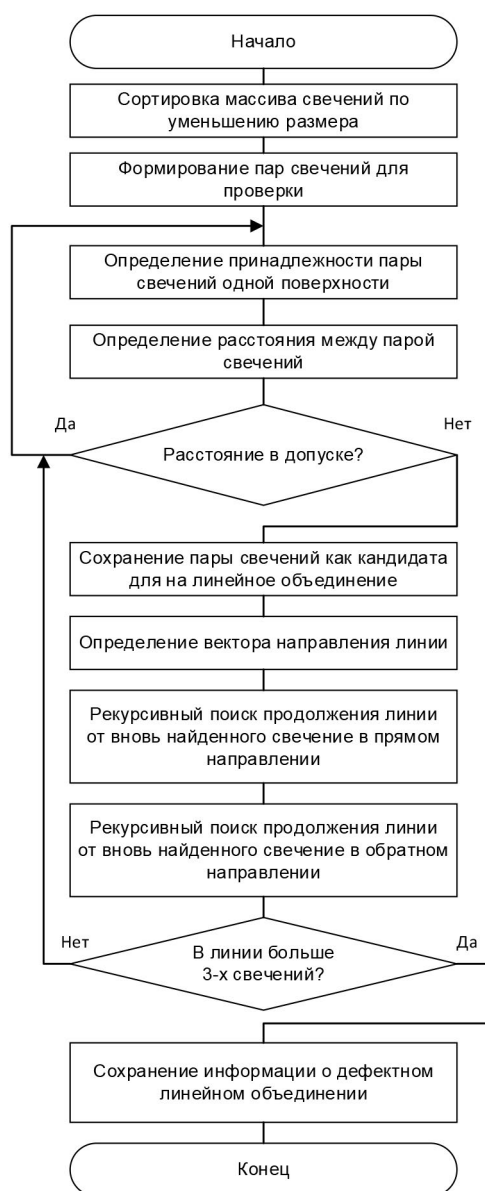


Рис. 6. Блок-схема алгоритма работы поиска свечений, объединённых в линию

и поверхности, но в дополнение к этому не отклоняться от полученного направления более чем на 30° . Поиск последующих свечений выполняется рекурсивно. После завершения поиска свечений в заданном направлении выполняется поиск свечений в обратном направлении по точно такому же принципу.

Если найденные свечения определяются как объединённые в линию, то они проверяются по критериям допустимости в соответствии с табл. 2. Если объединение признаётся недопустимым, то все входящие в него свечения исключаются из дальнейшего поиска.

На данном этапе завершается классификация найденных свечений.

Формирование результатов анализа

После того, как все свечения классифицированы и определена их допустимость по заданным критериям годности, выполняется запись полученных результатов.

Для каждого свечения (группы свечений), которое признано дефектом, сохраняется изображение, на котором выделяется место расположения данного дефекта. Помимо изображения сохраняется и информация о дефекте, а именно:

- класс дефекта;
- зона расположения дефекта;
- размеры дефекта.

После определения степени годности лопатки выполняется определения дальнейших действий, которые необходимо выполнить с ней. Может быть получено одно из 4 действий:

- «Дефектов не обнаружено, лопатка годная» – означает, что лопатка успешно прошла ЛЮМ-контроль;
- «Обнаружены свечения, выполните протирку» – на поверхности лопатки обнаружены дефекты, необходимо протереть их ацетоном и выполнить повторную проверку;
- «Обнаружены свечения, выполните зачистку» – на поверхности лопатки обнаружены дефекты, которые требуется зачистить и выполнить повторную проверку;
- «Обнаружены дефекты» – на поверхности лопатки обнаружены дефекты, лопатку необходимо отправить в брак.

Статус «Обнаружены свечения, выполните протирку» может появиться только в двух случаях:

- после первого осмотра лопатки были обнаружены дефекты;
- после зачистки на первом осмотре были обнаружены дефекты.

Статус «Обнаружены свечения, выполните зачистку» появляется, если выполняются следующие условия:

- лопатка ещё не была на зачистке;
- уже была выполнена протирка;
- среди обнаруженных дефектов отсутствуют линейные индикации, а также дефекты на пере лопатки.

Статус «Обнаружены дефекты» появляется, если выполняются следующие условия:

- лопатка была на зачистке, после чего была на протирке, но снова обнаружены дефекты;
- после протирки были обнаружены линейные индикации или дефекты на пере лопатки.

На этом этапе анализ поверхности лопатки на предмет дефектов под УФ-светом завершается.

Заключение

Представленная методика классификации свечений при выполнении процесса люминесцентного контроля лопаток газотурбинных двигателей позволяет реализовать алгоритм цифровой обработки полученных изображений и применить полученный результат в качестве промежуточного экспертного заключения (индикаторного типа) в работе установок автоматизированного контроля.

Библиографический список

1. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Полетаев. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
2. Глазков Ю.А. Капиллярный контроль / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: ИД «Спектр», 2011. – 144 с.
3. Контроль качества проникающими веществами. Капиллярный контроль / Н.П. Калинин, В.К. Кулешов, А.Н. Калинин. 2-е изд., перераб. и дополн. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 203 с.
4. Литература по капиллярному неразрушающему контролю – [Электронный ресурс] – Режим доступа URL: <https://ndt-testing.ru/> (дата обращения: 01.08.2021).
5. Попко Е. А. Опыт применения машинного зрения в системах оптического неразрушающего контроля / Е. А. Попко, А. П. Воробьев, И. А. Вайнштейн // Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (Екатеринбург, 24–25 ноября 2015 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 401–406.
6. Ермаков А.А. Методы и алгоритмы обработки и анализа снимков в капиллярной дефектоскопии. Автореф. канд. техн. наук. – Владимир: ВлГУ, 2009. – 19 с.
7. Shipway N.J., Barden T.J., Huthwaite P., Lowe M.J.S. Automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection using Random Forest // NDT & E International. – Volume 101. – 2019. – P. 113–123.
8. Shipway N.J., Huthwaite P., Lowe M.J.S., Barden T.J. Using ResNets to perform automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection // NDT & E International. – Volume 119. – 2021.
9. Karim Tout. Automatic Vision System for Surface Inspection and Monitoring: Application to Wheel Inspection. Signal and Image processing. Université de Technologie de Troyes – UTT, 2018.
10. Бобков А.В. Выделение отрезков на изображении в задаче ориентации по визуальной информации. // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2002. – № 3 (48).
11. Aust J., Shankland S., Pons D., Mukundan R., Mitrovic A. Automated Defect Detection and Decision-Support in Gas Turbine Blade Inspection. Aerospace 2021, 8, 30. <https://doi.org/10.3390/aerospace8020030>.
12. Пат. 2771442 Российская Федерация. Способ обработки изображений сверточными нейронными сетями / Заявл. 12.11.2020, Оpubл. 04.05.2020, бюл. № 13.
13. Пат. 104697 Российская Федерация. Устройство бесконтактного измерения шероховатости поверхностей деталей сложной формы / Заявл. 16.11.2010, Оpubл. 20.05.2011.
14. Пат. 126490 Российская Федерация. Программно-аппаратный комплекс машинного зрения для определения и контроля ширины межвиткового зазора / Заявл. 03.07.2012, Оpubл. 27.03.2013, бюл. № 9.
15. Пат. 2604168 Российская Федерация. Система машинного зрения, позволяющая определять неоднородности глубины объектов изображения / Заявл. 27.01.2012, Оpubл. 10.12.2016, бюл. № 34.
16. Пат. 2764644 Российская Федерация. Способ обнаружения дефектов поверхности, устройство обнаружения дефектов поверхности, способ производства стальных материалов, способ управления качеством стального материала, установка по производству стальных материалов, способ генерации моделей определения дефектов поверхности и модель определения дефектов поверхности / Заявл. 08.11.2019, Оpubл. 19.01.2022, бюл. № 2.
17. Пат. 2777718 Российская Федерация. Способ неразрушающего оптико-визуального контроля изделий методом машинного зрения / Заявл. 17.08.2021, Оpubл. 08.08.2022, бюл. №22.
18. Li C. et al. YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications //arXiv preprint arXiv:2209.02976. – 2022.
19. C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy H.-Y. M. Liao. “Yolov7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors,” arXiv preprint arXiv:2207.02696, 2022.
20. G. Jocher, A. Chaurasia, J. Qiu. “YOLO by Ultralytics.” URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, 2023 (Accessed: February 30, 2023).
21. Сычев И.Е., Литвиненко А.М. Автоматическая система распознавания дефектов на базе технического зрения // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы II Международной научно-практической конференции. 2020. – Изд-во Воронежского государственного технического

университета (Воронеж). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43939127>

22. Казаков О.Д., Ромашиов Н.Е. Обнаружение и распознавание объектов в реальном времени с помощью модели машинного обучения // Вызовы цифровой экономики: развитие комфортной городской среды. Труды III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Брянск, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», 2020. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44171509>

23. Ямщиков С. А. Компьютерное зрение в неразрушающем контроле // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности. Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. – Могилев: МГО ВО «Белорусско-Российский университет», 2021. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47155489>

24. Чикмарев Д.Д., Хабаров А.Р., Карельская К.А. Система компьютерного зрения для дефектоскопии объектов // Информационные ресурсы и системы в экономике, науке и образовании. Сборник статей XI Международной научно-практической конференции. Пенза: АНО «Приволжский Дом знаний», 2021. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46459923>

25. Форсайт Д.А., Понс Д. Компьютерное зрение. Современный подход. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с.

26. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 621 с.

27. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2001. – 784 с.

28. Приоров А.Л., Хрящев В.В., Топников А.И. Обработка и передача мультимедийной информации: учебное пособие. – Ярославль: ЯрГУ 2022.

29. Коротаев В.В., Краснящих А.В. Телевизионные измерительные системы / Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 108 с.

References

1. Poletaev V.A. Technology for the production of gas turbine engine blades / V.A. Poletaev. Moscow, Mechanical Engineering, 2006, p. 256.

2. Glazkov Yu.A. Capillary control / under general. ed. V.V. Klyueva. Moscow, Spektr Publishing House, 2011, p. 144.

3. Quality control using penetrants. Capillary control / N.P. Kalinichenko, V.K. Kuleshov, A.N. Kalinichenko. 2nd ed., revised. and additional. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2007, p. 203.

4. Literature on capillary non-destructive testing [Electronic resource], Access mode URL: <https://ndt-testing.ru/> (access date: 08.01.2021).

5. Popko E. A. Experience in the use of machine vision in optical non-destructive testing systems / E. A. Popko, A. P. Vorobyov, I. A. Vainshtein // Welding and diagnostics: collection of reports of the international forum (Ekaterinburg, November 24–25, 2015 g.). Ekaterinburg: UrFU, 2015, pp. 401-406.

6. Ermakov Alexander Andreevich. Methods and algorithms for processing and analyzing images in capillary flaw detection. Author's abstract. Ph.D. tech. Sciences. Vladimir: VIGU, 2009, p. 19.

7. Shipway N.J., Barden T.J., Huthwaite P., Lowe M.J.S. Automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection using Random Forest, *NDT & E International*, vol.101, 2019, pp. 113-123.

8. Shipway N.J., Huthwaite P., Lowe M.J.S., Barden T.J. Using ResNets to perform automated defect detection for Fluorescent Penetrant Inspection, *NDT & E International*, vol. 119, 2021.

9. Karim Tout. Automatic Vision System for Surface Inspection and Monitoring: Application to Wheel Inspection. Signal and Image processing. Université de Technologie de Troyes – UTT, 2018.

10. Bobkov A.B. Selection of segments in an image in the task of orientation based on visual information. *Bulletin of MSTU. Instrumentation*, 2002, No. 3 (48).

11. Aust, J.; Shankland, S.; Pons, D.; Mukundan, R.; Mitrovic, A. Automated Defect Detection and Decision-Support in Gas Turbine Blade Inspection. *Aerospace* 2021, 8, 30. <https://doi.org/10.3390/aerospace8020030>.

12. Method of image processing using convolutional neural networks / RF Patent No. 2771442, Appl. 11.12.2020, Publ. 05.04.2020, bul. no. 13.

13. Device for non-contact measurement of surface roughness of parts with complex shapes / RF Patent No. 104697, Appl. 11.16.2010, Publ. 05.20.2011.

14. Computer vision software and hardware complex for determining and controlling the width of the interturn gap / RF Patent No. 126490, Appl. 07.03.2012, Publ. 03.27.2013 bul. no. 9.

15. Computer vision system that allows you to determine inhomogeneities in the depth of image objects / RF Patent No. 2604168, Appl. 01.27.2012, Publ. 12.10.2016, bul. no. 34.

16. A method for detecting surface defects, a device for detecting surface defects, a method for producing steel materials, a method for managing the quality of steel materials, an installation for the production of steel materials, a method for generating models for determining surface defects and a model for determining surface defects / RF Patent No. 2764644, Appl. 08.11.2019, Publ. 01.19.2022, bul. no. 2.

17. Method of non-destructive optical-visual inspection of products using machine vision / RF Patent

No. 2777718, Appl. 08.17.2021, Publ. 08.08.2022, bul. no. 22.

18. Li C. et al. YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications //arXiv preprint arXiv:2209.02976. – 2022.

19. C.-Y. Wang, A. Bochkovskiy, and H.-Y. M. Liao, “Yolov7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors,” arXiv preprint arXiv:2207.02696, 2022.

20. G. Jocher, A. Chaurasia, and J. Qiu, “YOLO by Ultralytics.” <https://github.com/ultralytics/ultralytics>, 2023. Accessed: February 30, 2023.

21. Sychev I.E., Litvinenko A.M. Automatic defect recognition system based on technical vision, Alternative and intelligent energy. Materials of the II International Scientific and Practical Conference. 2020. Publisher: Voronezh State Technical University (Voronezh). <https://elibrary.ru/item.asp?id=43939127>.

22. Kazakov O.D., Romashov N.E. Detection and recognition of objects in real time using a machine learning model // Challenges of the digital economy: development of a comfortable urban environment. Proceedings of the III All-Russian scientific and practical conference with international participation. 2020. Publisher: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bryansk State Engineering and Technology University” (Bryansk). <https://elibrary.ru/item.asp?id=44171509>.

23. Yamshchikov S.A. Computer vision in non-destructive testing // New materials, equipment and

technologies in industry. Materials of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists. Editorial Board: M.E. Lustenkov (chief editor) [and others]. Mogilev, 2021. Publisher: Interstate educational institution of higher education “Belarusian-Russian University” (Mogilev). <https://elibrary.ru/item.asp?id=47155489>.

24. Chikmarev D.D., Khabarov A.R., Karel'skaya K.A. Computer vision system for flaw detection of objects // Information resources and systems in economics, science and education. Collection of articles of the XI International Scientific and Practical Conference. Edited by A.P. Remontova. Penza, 2021. Publisher: Autonomous non-profit scientific and 59 educational organization “Volga House of Knowledge” (Penza). <https://elibrary.ru/item.asp?id=46459923>.

25. Forsyth D.A., Pons D. Computer vision. Modern approach. Moscow, Williams, 2004, p. 928

26. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. Moscow, Tekhnosphere, 2005, p. 621.

27. Methods of computer image processing / Ed. V.A. Soifera. Moscow, Fizmatlit, 2001, p. 784.

28. Priorov A.L., Khryashchev V.V., Topnikov A.I. Processing and transmission of multimedia information: a tutorial. Yaroslavl, YarSU, 2022.

29. Korotaev V.V., Krasnyashchikh A.V. Television measuring systems / Textbook. St. Petersburg, St. Petersburg State University ITMO, 2008, p.108.

Информация об авторах

Алексеев Евгений Александрович – директор по цифровой трансформации, ПАО «ОДК-Сатурн»
evgeny.alekseev@uec-saturn.ru

Ломанов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, директор института информационных технологий и систем управления, ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»
frei@rsatu.ru

Information about the authors

Alekseev Evgeniy Alexandrovich – director of digital transformation, PJSC “UEC-Saturn”
evgeny.alekseev@uec-saturn.ru

Lomanov Alexey Nikolayevich – cand. Sc. of Engineering, docent, director of the “Institute of Information Technologies and Management Systems”, Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov
frei@rsatu.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

М.А. Волосова, В.Д. Гурин

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

КАФЕДРА «ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ» МГТУ «СТАНКИН: 25 ЛЕТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СФЕРЕ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ И ПЕРЕДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ

Аннотация

В 2025 году ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» отметит знаменательную дату – 95-летие с момента основания. Первое в стране высшее учебное заведение для подготовки инженерных кадров для нужд станкоинструментальной отрасли было создано 12 июля 1930 года. На протяжении всей истории университета его развитие и достижения определялись деятельностью ведущих кафедр и связанными с ними выдающимися учеными-педагогами. Одной из лидирующих кафедр МГТУ «СТАНКИН» сегодня является кафедра «Высокоэффективные технологии обработки» (ВТО), которая совсем недавно отметила свой юбилей – четверть века с момента создания, а профессор Григорьев Сергей Николаевич – 25 лет на посту заведующего кафедрой. Кадровой и научно-технической базой для создания кафедры ВТО послужила кафедра «Резание материалов», которая ведет свою историю с момента основания МГТУ «СТАНКИН» и многие годы являлась кузницей кадров для предприятий станкоинструментальной отрасли нашей страны. У руля кафедры в разные годы стояли выдающиеся советские ученые и новаторы – Панкин А.В., Глебов С.Ф., Кривоухов В.А., Аршинов В.А., Третьяков И.П., Старков В.К., Верещака А.С. Каждый из них – отдельная эпоха в истории становления и развития кафедры. Под руководством Григорьева С.Н. кафедра ВТО сохранила и приумножила традиции, заложенные предшественниками, на кафедре сформировалась научная школа высокоэффективных технологий обработки материалов, которая продолжила развитие не только классических тематик научных исследований, но и заложила базу для новых направлений научной и образовательной деятельности университета, сегодня определяющих его научно-техническое лидерство.

В статье описана история кафедры ВТО, представлены сведения о личностях, внёсших выдающийся вклад в ее становление и развитие, дается характеристика деятельности кафедры по различным направлениям в настоящий период.

Ключевые слова: высокоэффективные технологии обработки, кафедра, история, станки, резание материалов, ученые.

Для цитирования: Волосова М.А., Гурин В.Д. Кафедра «Высокоэффективные технологии обработки» МГТУ «СТАНКИН: 25 лет деятельности в сфере подготовки кадров и передовых исследований в интересах высокотехнологичных отраслей // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 126–135.

M.A. Volosova, V.D. Gurin

MSUT “STANKIN”

DEPARTMENT OF HIGH-EFFICIENCY PROCESSING TECHNOLOGIES AT MSUT “STANKIN”: 25 YEARS OF ACTIVITY IN THE FIELD OF PERSONNEL TRAINING AND ADVANCED RESEARCH IN THE INTERESTS OF HIGH-TECH INDUSTRIES

Abstract

In 2025, MSUT “STANKIN” will celebrate a significant date – the 95th anniversary of its founding. The country’s first higher education institution for the training of engineering personnel for the needs of the machine tool industry was established on July 12, 1930. Throughout the university’s history, its development and achievements have been determined by the activities of the leading departments and the outstanding scientists and educators associated with them. One of the leading departments of MSUT “STANKIN” today is the Department of High-Efficiency Processing Technologies (HEPT), which recently celebrated its anniversary – a quarter of a century since its establishment, and Professor Grigoriev Sergey Nikolaevich has been head of the department for 25 years. The personnel and scientific and technical base for the creation of the HEPT department was the Department of Cutting Materials, which traces its history back to the founding of the MSUT “STANKIN” and for many years has been a forge of personnel for enterprises of the machine tool industry in our country. At the helm of the department in different years were outstanding Soviet scientists and innovators – Pankin A.V., Glebov S.F., Krivoukhov V.A., Arshinov V.A., Tretyakov I.P., Starkov V.K., Vereshchaka A.S. Each of them is a separate epoch in the history of the formation and development of the department. Under the leadership of S.N. Grigoriev, the HEPT department has preserved and multiplied the traditions laid down by its predecessors. The department has formed a scientific school of highly efficient materials processing technologies, which has continued to develop not only classical research topics, but also laid the foundation for new areas of scientific and educational activities of the university, which today determine its scientific and technical leadership.

The article describes the history of the HEPT department, provides information about individuals who have made an outstanding contribution to its formation and development, and describes the department’s activities in various areas at the present time.

Keywords: high-efficiency processing technologies, department, history, machine tools, cutting materials, scientists.

For citation: Volosova M.A., Gurin V.D. Department of High-Efficiency Processing Technologies at MSUT “STANKIN”: 25 years of activity in the field of personnel training and advanced research in the interests of high-tech industries. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 126–135. (In Russian)

Кафедра резания материалов как фундамент для создания кафедры высокоэффективных технологий обработки

Кафедра высокоэффективных технологий обработки и ее научная школа ведут свою историю с 1930 года – с момента основания Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» и открытия кафедры «Резание материалов», основными направлениями деятельности которой являлись подготовка инженерных кадров для нужд станкоинструментальной промышлен-

ности и проведение исследований в области разработки прогрессивных технологий механической обработки и создания режущих инструментов с повышенными эксплуатационными свойствами [1, 2]. На протяжении всей истории кафедры ее возглавляли выдающиеся советские и российские ученые, внесшие большой вклад в развитие отечественного машиностроения (*рис. 1*).

Основоположником кафедры «Резание материалов» и первым ее заведующим выступил д.т.н., профессор Панкин Александр Васильевич, являющийся одним из ярких представителей русских



Рис. 1. Выдающиеся советские и российские ученые-педагоги, руководившие кафедрой на различных этапах ее становления и развития

ученых еще дореволюционного периода, прославивших советскую школу резания металлов, отличительной особенностью которой являлось тесное содружество науки с производством. Еще во время Первой мировой войны перед Панкиным А.В., который был известен как талантливый технолог и выдающийся организатор, была поставлена стратегическая задача организовать массовое производство гильз при малом количестве прессов и недостаточном количестве и маломощности токарных станков, создание которых для того времени было делом неимоверной сложности [3]. Панкин А.В. непосредственно участвовал в разработке и изготовлении режущих инструментов для токарной обработки гильз, именно по его инициативе на основе опыта лучших заводов впервые был создан альбом приспособлений, который являлся ориентиром для других предприятий. Возглавляемый Панкиным А.В. в 1930–1934 гг. коллектив кафедры резания материалов успешно участвовал в разработке рекомендаций по рациональным режимам обработки, необходимым для различных отраслей советской промышленности, которая в те годы переживала не лучшие времена.

В период 1934–1937 гг. кафедру возглавлял д.т.н., профессор Глебов Сергей Федорович. Его фундаментальный научный труд – многотомник «Теория наивыгоднейшего резания металлов» – во многом

предвосхитил современную идеологию оптимизации процесса и режимов резания. Предложенное им определение коэффициентов резания и обрабатываемости для каждой марки материала имело большое практическое значение и позволило точнее подойти к расчету усилий и режимов резания. Установленные в период становления науки о резании металлов Глебовым С.Ф. закономерности, в частности, формула определения силы резания, остаются актуальными и в настоящее время.

Дальнейшее развитие кафедры связано с именем видного ученого – д.т.н., профессора Кривоухова Василия Александровича, который возглавил кафедру в 1937 году и руководил ей в течение 15 лет. В этот период кафедрой непрерывно велась научно-исследовательская работа по разрешению важнейшей производственной задачи – высокоэффективного резания труднообрабатываемых материалов. Эти исследования выполнялись коллективом кафедры в рамках работы в Комиссии по резанию металлов, которая функционировала при техническом Совете Народного комиссариата тяжелой промышленности СССР. Была разработана единая методика экспериментального исследования основных стойкостных и силовых зависимостей, справочные материалы по режимам резания для всех видов инструментов, которые были положены в основу государственных стандартов и нормативов по режимам резания. Созданные кафедрой инженерные методы расчета оптимальных режимов резания позволяли сравнительно просто рассчитывать важные для практики характеристики процесса резания. Разработанные с участием коллектива кафедры руководящие материалы по режимам резания нашли применение в промышленности и использовались в годы Великой Отечественной войны.

Коллектив кафедры по заданию Бюро технических нормативов Министерства станкоинструментальной промышленности продолжил эти работы и в послевоенные годы. Они были значительно дополнены и расширены исследованиями д.т.н., профессора Аршинова Василия Андреевича, который возглавил кафедру резания материалов в 1952 году. Под его руководством был разработан комплекс новых эффективных смазочно-охлаждающих технологических средств на основе поверхностно-активных веществ. В этот период коллективом кафедры активно выполнялись работы в области повышения надежности инструмента совместно с научными институтами и заводами страны. В частности, совместно со Всероссийским научно-исследовательским и проектным институтом тугоплавких

металлов и твердых сплавов выполнялись работы, связанные с созданием новых твердых сплавов для обработки труднообрабатываемых материалов, а также разработкой эффективной технологии чистового точения колец подшипников из закаленных сталей для замены операции шлифования. Кроме того, были сформированы принципы конструирования и технология изготовления фасонных инструментов из пластифицированных твердых сплавов.

Развитие кафедры в период 1953–1985 гг. неразрывно связано с именем известного советского ученого – д.т.н., профессора Третьякова Ивана Петровича, сыгравшего особую роль в истории кафедры [4]. Коллектив кафедры (рис. 2) одним из первых в СССР успешно осуществил эксперименты по сверхскоростному резанию на уникальном стенде, имитирующем выстрел обрабатываемой заготовкой и ее перемещение относительно резца со скоростью, соизмеримой со скоростью полета пули. Под руководством Третьякова И.П. были заложены основные научные направления (в те годы – «пионерские»), ряд которых продолжает развиваться коллективом кафедры на современном этапе. В частности, был заложен фундамент важнейшего научного направления – создания износостойких покрытий для нужд инструментального производства [5]. Эти исследования выполнялись в кооперации с ведущими научно-исследовательскими отраслевыми институтами Украины, в частности, с Харьковским физико-техническим институтом АН УССР, разработавшим советскую вакуумно-дуговую установку «Булат-2М». В 1974 году были получены первые партии твердосплавных и быстрорежущих пластин, сверл с нитридитановыми покрытиями, испыта-

ния которых продемонстрировали ошеломляющие для того времени результаты – в процессе резания стойкость инструментов в 2,5–3 раза превосходила стойкость образцов без покрытия. Коллегией Государственного комитета СССР по науке и технике, которая рассматривала наиболее крупные вопросы ускорения научно-технического прогресса страны, учитывая выдающиеся результаты, полученные кафедрой резания материалов МГТУ «СТАНКИН» совместно с ХФТИ АН УССР, было принято решение о масштабировании оборудования и технологии до промышленного уровня и привлечении к работам кафедры ведущих отраслевых институтов – Всероссийского научно-исследовательского инструментального института, Научно-исследовательского института технологии автомобильной промышленности, Всероссийского научно-исследовательского и проектного института тугоплавких металлов и твердых сплавов, Всесоюзного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического институт электротермического оборудования.

Еще одно важное научное направление, связанное с мониторингом и диагностированием состояния процесса резания, инструментов и станочного оборудования, также сформировалось на кафедре резания материалов при Третьякове И.П. Учеными кафедры был предложен и реализован универсальный методический подход к построению систем диагностирования, основанный на прогнозировании выходных показателей на основе измерения и оценки косвенных диагностических признаков (силовых параметров, сигналов акустической эмиссии, ЭДС-резания), а на основе данных, накопленных за годы исследований, созданы модули диагностики для металлорежущих станков с ЧПУ [6].

В период 1985–1990 гг. кафедру резания материалов возглавлял д.т.н., профессор Старков Виктор Константинович (рис. 3). С его приходом



Рис. 2. Коллектив кафедры, 1977 год:
в нижнем ряду ведущие ученые кафедры
(слева направо) – А.С. Верещака, заведующий
кафедрой И.П. Третьяков, В.А. Синопальников
и В.И. Власов



Рис. 3. В.К. Старков проводит заседание кафедры,
1988 год

на кафедру стремительное развитие получило направление, связанное с созданием высокопроизводительных абразивных инструментов и технологий шлифования. Под его руководством был разработан принципиально новый тип шлифовальных высокопористых кругов на основе композиций с регулируемой пористостью из абразивных и сверхтвёрдых материалов с выгорающими и невыгорающими порообразователями в виде тонкостенных микросфер различного состава [7]. С использованием высокопористых кругов на производственных предприятиях страны были освоены новые технологии высокопроизводительного профильного глубинного и чистового шлифования зубчатых колёс, шлицевых соединений, фасонного режущего инструмента и других изделий сложного профиля.

В период 1990–1998 гг. история кафедры резания материалов связана с именем известного ученого и педагога – д.т.н., профессора Верещаки Анатолия Степановича. Его вклад в развитие в СССР технологий и оборудования для нанесения покрытий инструментального назначения сложно переоценить. В составе коллектива разработчиков за внедрение оборудования и технологии для нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент в промышленность страны в 1986 году ему была присуждена Государственная премия СССР. В этом же году он защитил первую в стране докторскую диссертацию, посвященную проблеме повышения работоспособности режущих инструментов нанесением износостойких покрытий.

Под руководством А.С. Верещаки молодые ученые кафедры (рис. 4) впервые получили многокомпонентные ионно-плазменные инструментальные покрытия типа TiCrN, TiMoN, TiZrCrN и масштабировали их до производственного уровня. Под



Рис. 4. Заведующий и молодые ученые кафедры, 1990 год: в нижнем ряду (слева направо) – А.К. Кириллов, С.Н. Григорьев, А.С. Верещака, С.В. Алешин, С.Ю. Федоров; в верхнем ряду (слева направо) – Г.В. Оганян и В.В. Кузин

его началом стартовали исследования по комбинированной ионно-плазменной обработке режущего инструмента, которая включала формирование диффузионного слоя в качестве фундамента для осаждаемых в последующем покрытий. На новые решения, разработанные членами коллектива кафедры в 90-х годах, были получены десятки авторских свидетельств СССР и международных патентов. Верещаке А.С. принадлежит большой вклад в интеграцию университета и коллектива кафедры в международное научное пространство. На протяжении многих лет под его руководством осуществлялось масштабное международное сотрудничество с университетами Германии, Швеции, Великобритании и других стран.

Создание и развитие кафедры высокоэффективных технологий обработки

На рубеже веков кадровая и научно-техническая база кафедры резания материалов послужила основой для создания кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» (Приказ № 292 от 23 сентября 1999 года). Название кафедры стало более объективно отражать содержание ее деятельности, направленной на решение широкого спектра проблем современного машиностроения и металлообработки. Созданную в 1999 году кафедру возглавил и руководит ей в настоящее время д.т.н., профессор Григорьев Сергей Николаевич, который смог не только сохранить уникальные традиции, сложившиеся за многолетнюю историю кафедры и заложенные выдающимися предшественниками, но и вывести кафедру на новый этап инновационного развития.

В 2000 году на кафедре открылись новые специальности подготовки дипломированных инженеров, программы подготовки магистров техники и технологий, научно-педагогических кадров в аспирантуре. Продолжили развитие традиционные для кафедры тематики научно-образовательной деятельности (резание материалов, диагностика состояния процесса резания и инструмента, износостойкие инструментальные покрытия), но и была сформирована получившая впоследствии стремительное развитие новая для того времени область – электронно-ионно-плазменные технологии для формообразования изделий и модификации поверхностных свойств деталей и инструмента. Сплотив вокруг себя творческий коллектив авторитетных специалистов разных поколений, а также своих учеников, Григорьев С.Н. сформировал научную школу высокоэффективных

технологий обработки материалов, которая неоднократно удостоивалась грантов Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ. На основе результатов исследований, выполненных под руководством Григорьева С.Н., было подготовлено 13 докторов и 27 кандидатов наук.

Научная школа кафедры высокоэффективных технологий обработки МГТУ «СТАНКИН» стала ведущей не только на российском, но и на международном уровне. О высочайшем уровне технологических и научно-методических разработок школы и представляющих ее ведущих педагогов и талантливых молодых ученых свидетельствуют правительственные и другие престижные награды, которых они были удостоены. В 2003 году заведующий кафедрой Григорьев С.Н. в составе коллектива авторов был удостоен премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за разработку и организацию серийного производства высокопроизводительного металлорежущего оборудования для высокоскоростной обработки сверхсложных деталей. В 2005 году за разработку и промышленное освоение автоматизированных технологических комплексов для упрочнения сложнопрофильных металлообрабатывающих инструментов молодые ученые кафедры – Волосова М.А., Кудымов Д.Н., Кутергина Т.В. и Черкасов П.М. под руководством Григорьева С.Н. – были удостоены премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых. В 2009 году образовательные заслуги кафедры были отмечены присуждением заведующему кафедрой Григорьеву С.Н. и ведущим профессорам Маслову А.Р. и Синопальникову В.А. премии Правительства Российской Федерации в области образования за разработку цикла учебно-методических и научных трудов «Инструментальное обеспечение машиностроительных производств». В 2014 году премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники за разработку и промышленное производство интерференционно-модуляционно-микроскопа и создание на его основе измерительно-информационного комплекса в составе коллектива авторов были удостоены заведующий кафедрой Григорьев С.Н. и ведущий научный сотрудник Андреев А.Г. Кроме того, в 2014 году за инновационные разработки в области технологий восстановления изношенных деталей автомобильной и дорожно-строительной техники ведущий научный сотрудник кафедры Окунькова А.А. в составе коллектива авторов была удостоена премии Правительства Российской Федерации в области



Рис. 5. Торжественное вручение В.В. Путиным заведующему кафедрой С.Н. Григорьеву государственной награды – почетного звания «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», 2011 год

науки и техники для молодых ученых. Молодые преподаватели и ученые кафедры неоднократно награждались премиями Правительства Москвы молодым ученым и грантами Президента РФ для поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук.

В 2011 году заведующему кафедрой Григорьеву С.Н. за выдающийся вклад в развитие науки в области технологии машиностроения, создание целого ряда важнейших научных трудов, а также значимую роль в подготовке высококвалифицированных научных кадров для отечественной промышленности было присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (рис. 5).

Стремительному развитию научно-образовательной деятельности кафедры во многом способствовала произошедшая радикальная модернизация ее учебно-лабораторной базы и оснащение самым передовым технологическим оборудованием и широкой гаммой аналитических приборов и систем для изучения свойств материалов. С их использованием исследования кафедры вышли на качественно новый уровень, а образовательный процесс подготовки бакалавров, магистров и аспирантов стал обеспечиваться на основе последних достижений науки и техники, что способствовало развитию их творческих способностей и наиболее полной реализации интеллектуального потенциала. Обучающиеся кафедры многократно становились победителями и призерами различных молодежных научных конкурсов и смотров всероссийского уровня – конкур-

сов на лучшую предпринимательскую инициативу «Московский молодёжный старт», всероссийских выставок научно-технического творчества молодёжи, молодежных научно-инновационных конкурсов в рамках программы «УМНИК», всероссийских конкурсов «Лучший инновационный проект в области металлообработки» и других. Достижение успехов в учебе и научных исследованиях обучающиеся кафедры многократно удостоивались стипендий Президента Российской Федерации для студентов и аспирантов, в том числе стипендий для обучения за рубежом. Многие из бывших студентов кафедры сегодня составляют основу ее кадрового состава.

Кафедра высокоэффективных технологий обработки в настоящее время

В настоящее время образовательная деятельность кафедры включает подготовку бакалавров по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (профиль – конструкторско-технологическое обеспечение высокоэффективных технологий обработки материалов), магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (профиль – технология размерной, формообразующей и физико-технической обработки) и аспирантов по направлению 15.06.01 «Машиностроение» (профиль – технологии и оборудование механической и физико-технической обработки).

Научно-педагогический состав кафедры сегодня представлен учеными и специалистами разных поколений (рис. 6). Общее число сотрудников кафедры насчитывает более 100 человек, среди них – 17 докторов и 20 кандидатов наук. Основу кадрового состава кафедры сегодня составляют не только авторитетные ученые, чья профессиональная дея-

тельность уже долгие годы неразрывно связана с МГТУ «СТАНКИН» (профессора Козочкин М.П., Гурин В.Д., Метель А.С., Кропоткина Е.Ю., Зверев И.А. и др.) но и ведущие ученые, за последние годы пришедшие на кафедру из других вузов и организаций (профессора Суминов И.В., Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Гусаров А.В., Кусманов С.А., Захаров О.В. и др.).

Поддержание лидерских позиций научной школы кафедры требует создания мощного кадрового потенциала из молодых активных исследователей, обладающих инновационным мышлением и творческим потенциалом (рис. 7). Поэтому развитие кадрового состава и направлений научно-исследовательской деятельности во многом базируется на перспективных молодых учёных – более половины членов коллектива кафедры моложе 39 лет. Ежегодно кафедра организует и проводит в университете Школу молодых ученых «Адаптивные материалы и покрытия для высокотехнологичных отраслей промышленности» в целях демонстрации потенциальных возможностей современных технологий для нужд высокотехнологичных отраслей промышленности и обсуждения перспектив их развития с российскими молодыми учеными и аспирантами.

Тематики научно-исследовательской и технологической деятельности кафедры сегодня базируются на основных трендах развития мировой науки и промышленности, охватывают все стадии жизненного цикла создания и функционирования высокотехнологичных материалов, изделий и систем в интересах приоритетных отраслей экономики (рис. 8).

В рамках указанных выше направлений коллективом кафедры накоплен уникальный задел и имеются компетенции, позволяющие решать самые сложные научно-технические и технологические задачи [8–10]. Знаковым событием с точки зрения



Рис. 6. Коллектив кафедры высокоэффективных технологий обработки, 2024 год



Рис. 7. Заведующий кафедрой с молодыми учеными, 2024 год: (слева направо) – П.А. Подрабинник, Н.В. Солис Пинарготе, С.Н. Григорьев, А.Е. Селезнев и П.Ю. Перетягин



Рис. 8. Приоритетные тематики исследований и разработок кафедры в интересах приоритетных отраслей экономики

укрепления авторитета научной школы кафедры высокоэффективных технологий обработки, признания ее лидерства в российском научно-образовательном сообществе и подтверждения мирового уровня выполняемых исследований стала победа функционирующей на базе кафедры лаборатории искрового плазменного спекания, возглавляемой Григорьевым С.Н., в конкурсе Российского научного фонда в рамках Президентской программы исследовательских проектов по поддержке лабораторий мирового уровня. В соответствии с программой исследований в 2021–2027 гг. коллективом научной школы разрабатывается комплекс инновационных технологий для формирования адаптивных материалов и покрытий, ориентированных на широкое промышленное применение на ведущих машиностроительных предприятиях.

Одним из приоритетов деятельности кафедры является не только подготовка инженерных и научно-педагогических кадров, востребованных машиностроительным комплексом страны, с использованием самых современных образовательных технологий и уникальной материально-технической базы, но и выполнение научных исследований и разработок, ориентированных на реальные потребности отечественных предприятий, в том числе в кооперации с другими научными школами, представляющими вузы и академические институты – ФГАОУ ВО «МФТИ», ФГБОУ ВО «Российский университет медицины», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» и др. Среди промышленных предприятий-заказчиков, использующих сегодня в своей деятельности инновационные разработки кафедры – АО «Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики», АО «Производственное объединение «Стрела», Производственный комплекс «Салют»

АО «ОДК» и др. На рис. 9 представлены некоторые примеры выполненных разработок.

Сегодня базой для подготовки кафедрой квалифицированных кадров и проведения научных исследований на мировом научно-техническом уровне являются технологические и исследовательские лаборатории университета – технологий микрообработки, технологий резания материалов, технологий нанесения покрытий и термообработки, технологий обработки концентрированными потоками энергии, инновационных аддитивных технологий, искрового плазменного спекания, исследования свойств материалов и метрологическая лаборатория.

Ежегодно на основе полученных инновационных результатов кафедра публикует около 100 статей в ведущих российских изданиях, входящих в базы Russian Science Citation Index, и зарубежных изданиях, индексируемых базами Web of Science и Scopus, из которых более 50 % – статьи в изданиях 1–2 квартиля. На оригинальные технические реше-

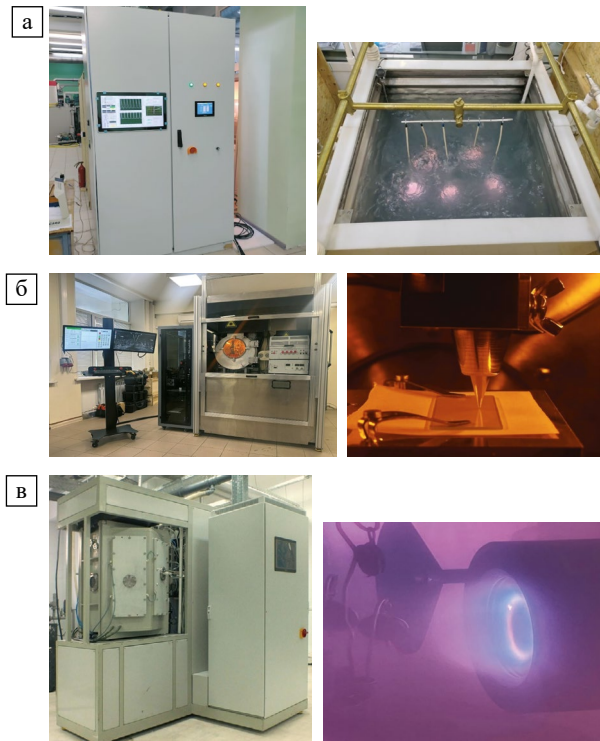


Рис. 9. Примеры выполненных научной школой кафедры разработок в интересах предприятий и организаций: а) получение антифрикционных покрытий для поршней реверсивного устройства авиационного двигателя посредством плазменно-электролитной обработки для ОДК – Пермские Моторы; б) изготовление опытного образца системы управления принтером плазменных наноструктур для МФТИ; в) разработка многослойных вакуумно-плазменных износостойчивых покрытий для инструмента, обрабатывающего никелевые и титановые сплавы, для ПО «Стрела»



Рис. 10. Вручение ректором МГТУ «СТАНКИН» В.В. Серебряным молодому ученому кафедры Э.С. Мустафаеву золотой медали Гонконгского международного конкурса изобретений и дизайна, 2025 год

ния кафедра ежегодно получает более 20 патентов Российской Федерации на изобретения и полезные модели, а также свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Кафедра традиционно ведет активную изобретательскую деятельность. Инновационные разработки, созданные коллективом кафедры с участием аспирантов и молодых ученых, ежегодно отмечаются медалями и наградами авторитетных международных выставок и форумов (рис. 10).

За четверть века своего существования кафедра высокоэффективных технологий обработки МГТУ «СТАНКИН» смогла сохранить и приумножить традиции, заложенные выдающимися советскими учеными и педагогами, на кафедре сформировалась научная школа высокоэффективных технологий обработки материалов, которая продолжила развитие не только классических тематик научных исследований, но и заложила базу для новых направлений научной и образовательной деятельности университета, сегодня определяющих его научно-техническое лидерство – вакуумно-плазменной, плазменно-электролитной, электроэрозионной и лазерной обработки материалов, систем контроля и диагностики сложных процессов обработки, аддитивного производства изделий, искрового плазменного спекания металлокерамических и керамических материалов и ряда других.

Основными приоритетами деятельности кафедры является не только использование современных образовательных технологий и уникальной

материально-технической базы для подготовки инженерных и научно-педагогических кадров, востребованных машиностроительным комплексом страны, но и, с учетом мировых тенденций развития техники и технологий, выполнение научных исследований и разработок, ориентированных на реальные потребности отечественных предприятий.

Сегодня перед кафедрой поставлена задача дальнейшего развития и укрепления ее позиций как ведущего научно-образовательного центра в области высокоэффективных технологий обработки, а коллектив кафедры подготовлен к новым вызовам, связанным с необходимостью обеспечения технологического суверенитета страны.

Библиографический список

1. Соломенцев Ю.М. К 75-летию научной школы «Высокоэффективные технологии обработки» МГТУ «СТАНКИН» / Ю.М. Соломенцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 9. – С. 2–3.
2. Григорьев С.Н. Научные школы в истории МГТУ «СТАНКИН» / С.Н. Григорьев // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – № 4 (12). – С. 7–21. – EDN: NDGCQJ.
3. Грико Т.И. Александр Васильевич Панкин (опыт биографической реконструкции) / Т.И. Грико // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – Т. 2, № 4(18). – С. 186–190.
4. Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» [научные школы, традиции и инновации / С.Н. Григорьев (отв. ред.), Е.П. Бармина, М.А. Волосова и др.]. — Москва: Янус-К, 2011. – 223 с.
5. Верещака А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями: Библиотека инструментальщика / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – М.: 1986. – 192 с.
6. Диагностика автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, М. П. Козочкин и др. – М.: Машиностроение, 2011. – 600 с.
7. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. Учебное пособие / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
8. Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента: Учебное пособие для студентов и аспирантов высших учебных заведений / В.П. Табаков, А.С. Верещака, С.Н. Григорьев, А.А. Верещака. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2023. – 227 с.

9. Плазменно-электролитная обработка. Микро-дуговое оксидирование: Учебное пособие для студентов и аспирантов высших учебных заведений / А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, И.В. Суминов и др. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2020. – 193 с.

10. Григорьев С.Н. Перспективные методы электроэрозионной обработки керамики / С.Н. Григорьев, А.А. Окунькова, М.А. Волосова. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2020. – 192 с.

References

1. Solomentsev, Yu. M. On the 75th anniversary of the scientific school “Highly Efficient processing technologies” of MSUT “STANKIN” / Yu. M. Solomentsev. *Hardening technologies and coatings*, 2005, No. 9. P. 2–3.

2. Grigoriev, S. N. Scientific schools in the history of MSUT “STANKIN” / S. N. Grigoriev. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2010. No. 4 (12). P. 7–21. EDN: NDGCQJ.

3. Griko, T. I. Alexander Vasilyevich Pankin (experience of biographical reconstruction) / T. I. Griko. *Izvestiya MGTU “MAMI”*. 2013. Vol. 2, No. 4(18). P. 186–190.

4. Moscow State University of Technology “STANKIN” [scientific schools, traditions and in-

novations / S.N. Grigoriev (editors), E.P. Barmina, M.A. Volosova et al. Moscow: Janus-K, 2011. 223 p.

5. Vereshchaka, A. S. Cutting tools with wear-resistant coatings: Toolmaker’s library / A.S. Vereshchaka, I.P. Tretyakov. Moscow, 1986. 192 p.

6. Diagnostics of automated production / S.N. Grigoriev, V. D. Gurin, M. P. Kozochkin et al. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2011. – 600 p.

7. Starkov, V. K. Grinding with highly porous circles. Textbook / V. K. Starkov. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2007. 688 p.

8. Principles of formation and technology of applying wear-resistant coatings of cutting tools: A textbook for students and postgraduates of higher educational institutions / V.P. Tabakov, A.S. Vereshchaka, S.N. Grigoriev, A.A. Vereshchaka. 2nd edition, revised and supplemented. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University, 2023. 227 p.

9. Plasma-electrolyte treatment. Microarc oxidation: A textbook for undergraduates and postgraduates of higher educational institutions / A.V. Epelfeld, V.B. Lyudin, I.V. Suminov [et al.]. – Moscow: MSUT “STANKIN”, 2020. – 193 p.

10. Grigoriev, S. N. Promising methods of electroerosion treatment of ceramics / S.N. Grigoriev, A.A. Okunkova, M.A. Volosova. Moscow: MSUT “STANKIN”, 2020. 192 p.

Информация об авторах

Волосова Марина Александровна – доктор технических наук, доцент кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
m.volosova@stankin.ru

Гурин Владимир Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки, ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
v.gurin@stankin.ru

Information about the authors

Volosova Marina Alexandrovna – D.Sc. of Engineering, associate professor at the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”
m.volosova@stankin.ru

Gurin Vladimir Dmitrievich – D.Sc. of Engineering, Professor at the sub-department of “High-Efficiency Processing Technologies”, MSUT “STANKIN”
v.gurin@stankin.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.

Индексирование журнала
«Вестник МГТУ «Станкин» в системах:

Высшая аттестационная комиссия (ВАК) при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации

https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=_tab:editions~

Российский индекс научного цитирования (РИНЦ): eLIBRARY.ru

https://www.elibrary.ru/title_about_new.asp?id=28046

Государственная публичная научно-техническая библиотека России (ГПНТБ России)

[https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC&lf=1&rc=20&base%5B%5D=ESVODT&o=search&](https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC&lf=1&rc=20&base%5B%5D=ESVODT&o=search&ftexpression=Вестник+МГТУ+СТАНКИН)

[ftexpression=Вестник+МГТУ+СТАНКИН](https://cat.gpntb.ru/index.php?id=EC&lf=1&rc=20&base%5B%5D=ESVODT&o=search&ftexpression=Вестник+МГТУ+СТАНКИН)

Базы данных ВИНТИ РАН

Научно-техническая библиотека ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

https://stankin.ru/subdivisions/id_129/about



Требования к оформлению статей см.

<http://stankin-journal.ru>, https://stankin.ru/pages/id_75/page_229

Распространяется по подписке

Подписной индекс **48635** в каталоге «Пресса России»

https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e48635/

The journal is distributed only by subscription

Subscription index **48635** in the consolidated catalogue “The Press of Russia”

Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Адрес редакции:

127055, Москва, Вадковский пер., 1.

Сайт журнала <http://vestnikstankin.ru>

Рукописи представляются в редакцию по электронной почте vestnik@stankin.ru, orni.stankin@mail.ru

Выпуск журнала подготовлен

Объединенной редакцией научных изданий ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Подписано в печать 27.02.2025

Формат 60 × 90 1/8. Усл. печ. л. 18.

Тираж 200 экз. Заказ 36.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

127055, Москва, Вадковский пер., 3а