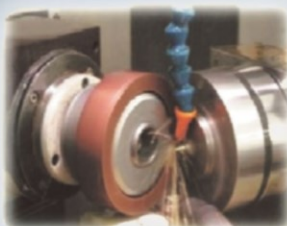


НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

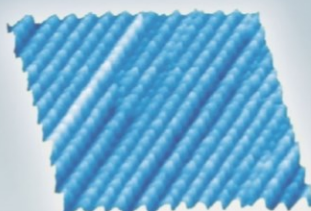
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

6 (156)
2024

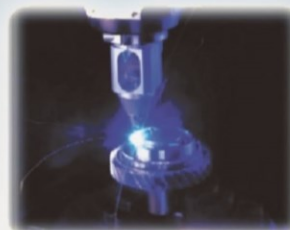
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



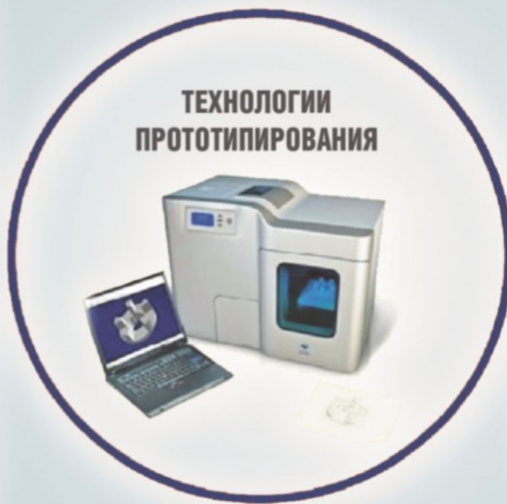
**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



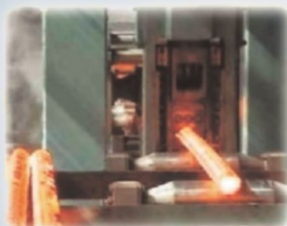
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



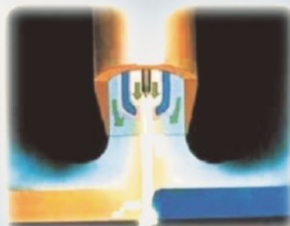
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



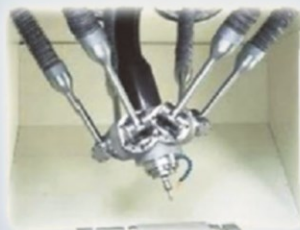
**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 6 (156)

2024

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г. (г. Москва)

Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

д.т.н., чл.-корр. РАН ПРИХОДЬКО В.М.
(г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г. (г. Москва)

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БУЯНОВСКИЙ И.А. (г. Москва)

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

д.т.н., проф. ГУСЕЙНОВ Г.А. (г. Баку,
Азербайджан)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. КАВАЛЕК А.А. (г. Ченстохова,
Польша)

д.н., магистр наук КРЕХЕЛЬ Р. (г. Капушан,
Словакия)

д.т.н., проф. КУКСЁНОВА Л.И. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

д.т.н., акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк)

д.т.н., акад. НАН Беларуси МЫШКИН Н.К.
(г. Гомель, Беларусь)

д.т.н., проф. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПЕТРОВА Л.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. ФЕДОНИН О.Н. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., доц. ШОХИЁН А.Н. (г. Куляб, Таджикистан)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить по интернет-
каталогу "Пресса по подписке".

Подписной индекс: **Э79195**.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
26 апреля 2019 года
рег. номер ПИ № **ФС77-75524**

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М. Трансформация
взглядов на теорию резания при переходе к «цифре». 3

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Демин В.А. Научноёмкие технологии обработки давлением
в машиностроении, авиации и транспорте 13

Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В. Горячее деформирование корпусных
заготовок в изотермических условиях 21

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Кочубей А.А., Ширин А.А.
Технологические возможности применения вращающегося
электромагнитного поля в металлообрабатывающем производстве 29

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

Вартанов М.В., Линь Н.В. Адаптивное оборудование
и технологическая оснастка для автоматической сборки 36

*Журнал входит в перечень изданий ВАК, утвержденных для соискателей
ученых степеней по научным специальностям: 2.5.3 - Трение и износ в
машинах; 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки; 2.5.6 - Технология машиностроения; 2.5.7 -
Технология и машины обработки давлением; 2.5.8 - Сварка, родственные
процессы и технологии; 2.6.17 - Материаловедение (по отраслям)
(технические науки).*

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,
публикуемых в журнале «Научноёмкие технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 6 (156)

2024

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s., prof. SUSLOV A.G. (Moscow)

Deputy chief editor

d.en.s., assoc. prof. SHALYGIN M.G. (Bryansk)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIKHODKO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGORYANTS A.G. (Moscow)

Editorial Committee:

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BUYANOVSKII I.A. (Moscow)

PhD., Dr. Engineer WALDENMAIER T.

(Stuttgart, Germany)

d.en.s., prof. HUSEYNOV H.A. (Baku,
Azerbaijan)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. KAWALEK A.A. (Czestochowa,
Poland)

PhD., Msc. KREHEL R. (Kapusany, Slovakia)

d.en.s., prof. KUKSENOVA L.I. (Moscow)

d.en.s., prof. LARIN S.N. (Tula)

d.en.s., Acad. RASLYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm)

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIKHAILOV A.N. (Donetsk)

d.en.s., MYSHKIN N.K. Acad. of NAS Belarus
(Gomel, Belarus)

d.en.s., prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

d.en.s., prof. PETROVA L.G. (Moscow)

d.en.s., prof. SMOLENTSEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. FEDONIN O.N. (Bryansk)

d.en.s., prof. KHEIFETZ M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. TCHIGIRINSKY Ju.L. (Volgograd)

d.en.s., assoc. prof. SHOHYON A.N. (Kulob,
Tajikistan)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

The magazine is distributed by subscription,
which can be issued through the online catalog
"Subscription Press".

Subscription index: **379195**.

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

**The journal is registered by the Federal
service for supervision of communications,
information technologies and mass
communications (Roskomnadzor)
26.04.2019 registration number
print publication № FS77-75524**

CONTENTS

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Frolov E.M. Transformation of narratives
of the cutting operation theory in passing to the «digit» 3

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF METAL PROCESSING BY PRESSURE

Demin V.A. Pressing Hi-Techs in mechanical engineering, aviation
and transport 13

Larin S.N., Bessmertnaya Yu.V. Hot forming of box-shaped material blanks
under isothermal conditions 21

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

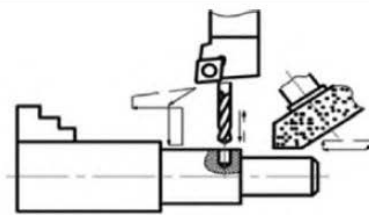
Lebedev A.V., Vernigorov Yu.M., Kochubey A.A., Shirin A.A. Technology
options for rotating magnetic field when used in metalworking industry 29

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MACHINE ASSEMBLY

Vartanov M.V., Lin N.V. Adaptable system of equipment and jigging
for automatic assembly 36

The journal is included in the list of publications of the HAC approved for applicants of
academic degrees in scientific specialties: 2.5.3 - Friction and wear in machines;
2.5.5 - Technology and equipment of mechanical and physico-technical processing;
2.5.6 - Mechanical engineering technology; 2.5.7 - Technology and pressure treatment
machines; 2.5.8 - Welding, related processes and technologies; 2.6.17 - Materials
Science (by industry) (technical sciences).

**Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»**



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6 (156). С.3-12.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P.3-12.

Научная статья

УДК 621.91.01; 621.9.011

doi: 10.30987/2223-4608-2024-6-3-12

Трансформация взглядов на теорию резания при переходе к «цифре»

Юлий Львович Чигиринский¹, д.т.н.

Дмитрий Вадимович Крайнев², к.т.н.

Евгений Михайлович Фролов³, к.т.н.

^{1, 2, 3} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5620-5337>

² krainev dv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8762-4251>

³ e_frolov@vstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8753-5910>

Аннотация. Рассмотрены основные задачи теории резания металлов в традиционном представлении науки о механизмах и закономерностях изнашивания инструмента в процессе лезвийной обработки. Показано, что необходимость постоянного расширения области интересов специалистов продиктована совершенствованием конструктивных и инструментальных материалов и конструктивной структуры лезвийного инструмента – расширяющимся распространением твердосплавных инструментов с многослойными износостойкими покрытиями, конструктивных материалов с повышенными физико-механическими и специальными эксплуатационными характеристиками. Повышенные требования к стабильности процессов механической обработки определяются увеличением удельного веса дорогостоящего оборудования с ЧПУ в общей массе средств оснащения механообрабатывающих производств. Кастомизация машиностроительного производства и ужесточение функциональных требований к производимой продукции требует повышения надежности обеспечения результатов механической обработки. Фактором, определяющим изменение «вектора внимания» науки о резании металлов, следует считать расширение области влияния информационных технологий и, в частности, развитие систем искусственного интеллекта. Показано, что существующие средства цифровизации позволяют значительно повысить эффективность механообрабатывающего производства за счет развитых средств математического моделирования и прогнозирования результатов обработки. Дополнительным механизмом обеспечения стабильности и надежности металлообработки следует считать переход от систем мониторинга состояния элементов технологической системы к системам адаптивного управления с обратной связью. Обоснована возможность адаптации условий резания к «мгновенному» состоянию элементов технологической системы с учетом стохастического характера и вариабельности свойств контактной пары «инструмент – заготовка». Таким образом, цифровизация и интеллектуализация производства определяют трансформацию взглядов на предмет и методы науки о резании.

Ключевые слова: теория резания, работоспособность инструмента, механизм изнашивания, качество поверхности, стабильность процесса, надежность производства, искусственный интеллект, адаптивное управление, информационный канал

Благодарности: при подготовке статьи использованы материалы исследований, выполненных за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00101.

Для цитирования: Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М. Трансформация взглядов на теорию резания при переходе к «цифре» // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-12

Transformation of narratives of the cutting operation theory in passing to the «digit»

Yuliy L. Chigirinsky¹, D. Eng.

Dmitry V. Krainev², Ph.D. Eng.

Evgeny M. Frolov³, Ph.D. Eng.

^{1, 2, 3} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ julio-tchigirinsky@yandex.ru

² krainevdv@mail.ru

³ e_frolov@vstu.ru

Abstract. The main tasks of the theory of metal cutting in the traditional scientific view of the mechanisms and patterns of tool wear in the operation of edge cutting machining are viewed. It is shown that the need for continuous expansion of the field of interests of specialists is derived from the improvement of construction and tool materials as well as blade tools structure. It is caused by the expanding spread of hard-alloy tools having multilayer wear-resistant coatings, structural materials with increased physical, mechanical and special operation characteristics. Exclusive standards for the stability of machining operations resulted from the gain in specific weight of expensive CNC equipment in the total mass of production tooling for machining industries. The customization of machine-building production and functional requirement toughening for the manufactured products specifies reliability growth for the results of machining. The factor determining the «vector of attention» change regarding metal cutting science should take into account the expansion of information technologies influence and, in particular, the development of artificial intelligence systems. It is shown that the existing means of digitalization can significantly increase the efficiency of machining production due to the developed means of mathematical modeling and forecasting of processing results. An additional mechanism for ensuring the stability and reliability of metalworking should be considered as the transition from monitoring systems of the technological system element state to adaptive control systems with a feedback. The possibility of adapting cutting conditions to the «instantaneous» state of the elements of the technological system is proved, taking into account the stochastic nature and a variability of the properties of the contact pair «tool – material blank». Thus, digitalization and intellectualization of production determine the transformation of views on the subject as well as metal cutting techniques.

Keywords: cutting theory, tool operability, wear mechanism, surface quality, process stability, production reliability, artificial intelligence, adaptive control, information channel

Acknowledgements: in the preparation of this article, the materials of research carried out were used at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 19-19-00101.

For citation: Chigirinsky Yu. L., Krainev D.V., Frolov E.M. Transformation of narratives of the cutting operation theory in passing to the «digit» / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 3–12. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-12

Введение

Развитие науки и технический прогресс расширяют возможности производства и открывают доступ к более совершенным кастомизированным продуктам, техническим средствам, машинам и устройствам. В машиностроении это инициирует рост уровня автоматизации как отдельных внутренних производственных процессов, так и технологических операций. Закономерно увеличивается доля применения станков с ЧПУ, а также их сложность и уровень автономности, что ведет к повышению стоимости производственного оборудования. Продуктивное время работы станка становится одним из ключевых

показателей финансовой эффективности. При этом, порядка 10 % общего времени работы станочного оборудования составляют затраты времени на выявление и ликвидацию отказов режущего инструмента. Эксперты [1] отмечают (рис. 1), что выход из строя инструмента (рис. 2) вызывает, помимо названных затрат времени, дополнительные потери в виде повышенного выхода производственного брака и увеличения интенсивности износа оборудования.

Непрогнозируемый (рис. 2) выход инструмента из строя приводит к необходимости преждевременной замены инструмента. В результате, возрастают расходы на инструмент, который, в ряде случаев [3],

вырабатывает не более 65 % ресурса. О существенности влияния стабильности и управляемости процессов изнашивания режущего инструмента на качество продукции и, в конечном итоге, на экономическую эффективность машиностроительного производства говорят эксперты – K. Zhu и Y. Zhang, X. Wu, J. Li, Y. Jin и S. Zheng, P. Wang и R. X. Gao, и др., – в области организации современного многономенклатурного машиностроительного производства. Оценка износа и прогнозирование срока службы инструмента необходима для достижения устойчивого производства, поскольку они обеспечивают научную основу для принятия важных решений, таких как планирование технического обслуживания и управление запасами.

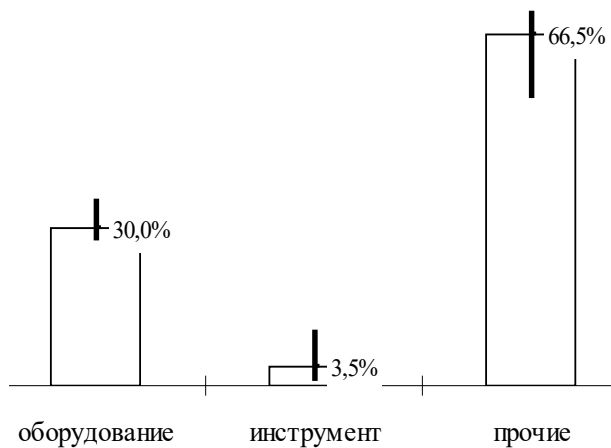


Рис. 1 Укрупненная структура затрат [1]

Fig. 1 Enlarged cost structure [1]

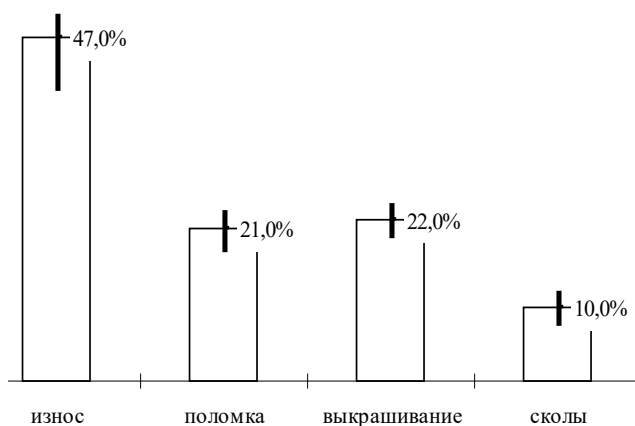


Рис. 2 Отказы инструмента [2]

Fig. 2 Tool failures [2]

Стабильность технологической операции обеспечивается определенным комплексом свойств инструмента. В зависимости от области применения, к функциональным свойствам инструмента относят высокую твердость, сопротивление истиранию, красностойкость и устойчивость к химическому (диффузионному) изнашиванию, высокую вязкость – для работы в условиях ударных нагрузок и др. Прогнозируемый, стабильный процесс изнашивания инструмента предоставляет возможность обоснованного прогнозирования ресурса времени работы инструмента до критической величины. Образование сколов и выкрашивание режущей кромки имеет вероятностный характер, который проблематично спрогнозировать, следовательно, и результаты прогнозирования в отношении результатов технологической операции, также будут неоднозначными.

Отметим что, до определенного момента времени, основной интерес специалистов в области науки о резании металлов – научные школы Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макарова, А.Н. Резникова, Н.В. Талантова, Л.В. Худобина и др., – был направлен именно на изучение физико-химических процессов, определяющих работоспособность режущего инструмента и на поиск направлений повышения его работоспособности.

Необходимость повышения ресурса работоспособности инструмента и производительности обработки привели к практически повсеместному применению режущих твердосплавных пластин с многослойными износостойкими покрытиями [4, 5], доля которых в общей массе режущего инструмента достигает до 90 %. Износостойкие покрытия (рис. 3 а, б) позволяют повысить срок службы инструмента, стойкость к нагрузкам в 2 – 6 раз, термостойкость и скорость обработки свыше 25 %, а также снизить расход инструмента и СОЖ.

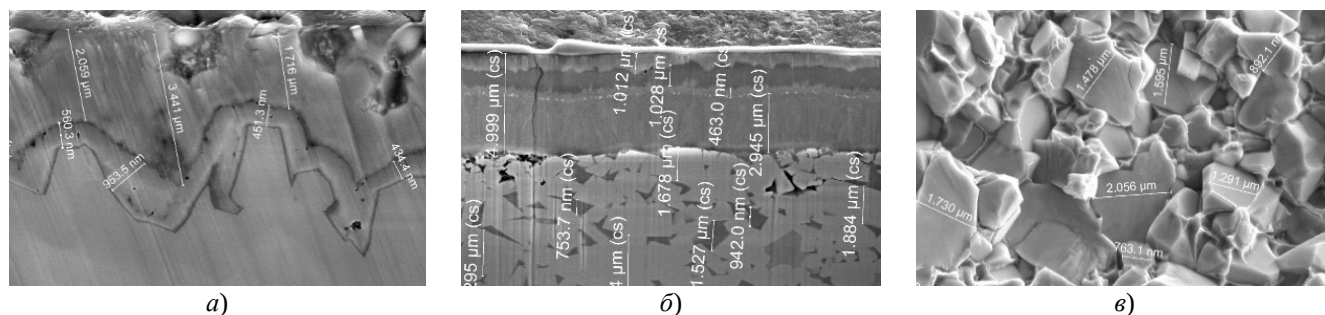


Рис. 3. Непостоянство и неоднородность размеров элементов структуры твердосплавного инструмента с износостойким многослойным покрытием [15]:

a – многослойное покрытие; *б* – приповерхностный слой твердосплавной матрицы с покрытием; *в* – твердосплавная матрица

Fig. 3. Variability and heterogeneity of structural elements sizes for carbide tools having a wear-resistant multilayer coating [15]:

a – multilayer coating; *b* – surface layer of a coated carbide matrix; *c* – carbide matrix

Повышение износостойкости инструмента обеспечивается за счет функциональности отдельных слоев покрытия, обеспечивающих снижения интенсивности окислительных и диффузионных процессов, адгезии, формирование термоизоляции, и т. д. Стабильность свойств твердосплавного инструмента с покрытиями и, следовательно, стабильность процессов лезвийной обработки следует считать недостаточной, поскольку физико-механические [7] свойства твердосплавных пластин варьируются (рис. 3 *a*, *в*) в достаточно широких интервалах.

Влияние структурных элементов современного режущего инструмента на контактные процессы при резании

Особо остро вопросы прогнозирования периода стойкости и мониторинга состояния режущего инструмента стоят в автоматизированном производстве, оснащенном оборудованием с программным управлением – такое производство, при должной организации, уже можно условно считать «цифровым». Применение дорогостоящего оборудования диктует необходимость повышения эффективности производства – и в части производительности обработки, и в отношении работоспособности инструмента, и в отношении обеспечения стабильного обеспечения технических требований к изготавливаемой продукции.

На работоспособность инструмента оказывают влияние: геометрические параметры инструмента; режимы резания; СОТС;

состояние оборудования и вспомогательного инструмента; жёсткость технологической системы. Режущие свойства сменных пластин определяются не только геометрическими параметрами [4], но и характеристиками износостойких покрытий, твердосплавной матрицы и др. Количественная оценка данных параметров достаточно трудоемка и, как правило, требует разрушающих методов контроля.

Форма, характер износа, а также диапазон режимов резания зависят от физико-механических свойств и химического состава материалов контактной пары. Указанные характеристики напрямую определяют интенсивность отдельных составляющих разрушения инструмента: адгезия, диффузия и другие [8]. Одним из главных факторов, интенсифицирующих износ инструмента с ростом скорости резания, является температурное воздействие [9]. Следует отметить отсутствие однозначности в определении значимости и характера влияния технологических и конструктивных параметров обработки на ее результат. Например, ряд исследователей [4, 9] утверждают, что при обработке на низких скоростях резания, то есть при относительно невысоких контактных температурах, превалируют адгезионно-усталостный и абразивный виды изнашивания. По другим данным [8], как адгезионно-усталостный, так и диффузионный механизмы изнашивания могут существовать в широком диапазоне скоростей. Интенсификация данных механизмов износа в диапазоне высоких скоростей резания в значительной степени определяется

химическим составом материалов контактной пары и характерна для обработки материалов склонных к циклическому стружкообразованию.

Применение износостойких многослойных покрытий (табл. 1) оказывает существенное влияние на характер контактного взаимодействия при резании

1. Область применения покрытий

1. Coatings applicable scope

Основной материал	Характерное свойство	Основное назначение	Ограничения
TiN	Химическая пассивность	Снижение интенсивности наростообразования, силовой и температурной напряженности	Низкая эффективность при обработке вязких алюминиевых, титановых и хромоникелевых сплавов
Al ₂ O ₃	Низкая теплопроводность, жаропрочность	Создание барьера для диффузионного износа в диапазоне температур 600...1000 °С [9, 10]	Хрупкость, отсутствие сопротивления ударным и знакопеременным нагрузкам
TiC, TiCN, TiAlN	Высокая прочность, стойкость к абразивному воздействию, жаропрочность, химическая стойкость	Повышение твердости поверхности, создание теплового барьера на контактных поверхностях инструмента [13]	

Происходит перераспределение тепловых потоков, а также уменьшаются силы трения по передней поверхности инструмента и нормальные силы. Закономерно уменьшается степень пластической деформации в зоне стружкообразования. Вместе с тем, отмечается существенная зависимость эффективности покрытий от технологии (CVD / PVD) их нанесения и определенная противоречивость [4] в оценке области применения и ограничений с учетом технологии нанесения

Кроме того, температурно-силовое воздействие на инструмент приводит к упругопластической деформации режущего клина, что дополнительно изменяет физическую картину взаимодействия инструмента с заготовкой. На участке пластического контакта образуются поперечные трещины, расположенные вдоль режущей кромки, перпендикулярно направлению схода стружки. Интенсивность разрушения износостойких покрытий различается в зависимости от состава режущей пластины и назначенных режимов резания, однако имеет общий качественный характер [4].

Таким образом, отдельные элементы многослойных износостойких покрытий и твердосплавной матрицы при качественном

сохранении общей динамики контактного взаимодействия влияют на интенсивность отдельных процессов и явлений. Это выражается в количественном изменении величины износа инструмента и результатов обработки.

Экспериментальная оценка свойств режущего инструмента – методика

Изучение контактных процессов и режущих свойств инструмента выполнялось при точении предварительно обработанных заготовок из конструкционной легированной стали 40X (5135, 5140) – группа обрабатываемости *P* по ГОСТ 19042-80 (ИСО 1832-85), хромистой нержавеющей стали 40X13 (AISI420) – группа обрабатываемости *M*, и жаропрочной стали марки 08X21H6M2T (ЭП54, 329) – группа обрабатываемости *S*.

Инструментальный материал – твердосплавные пластины типоразмера WNMG 08 04 08 для чистовой и получистовой обработки с многослойным Ti(CN) / Al₂O₃ / TiN CVD покрытием. Состав экспериментального оборудования и методы исследования инструмента показаны в табл. 2.

2. Оборудование и методы исследований

2. Equipment and research methods

Характеристика	Метод исследования	Оборудование
Работоспособность	Стойкостные испытания	Станок токарно-револьверный с ЧПУ OKUMA Genos L-300 M
Контактные процессы	Металлографические исследования и спектральный анализ –FIB (Focused ion beam) микроскопия	Растровый двухлучевой электронный микроскоп VERSA 3D FEI
Температуропроводность и теплопроводность	Метод лазерной вспышки	LFA 467
Поверхностная электропроводность	Измерения на постоянном токе	Многофункциональный цифровой измеритель MS8226 DMM
Объемная электропроводность	Измерения на постоянном и переменном токе	Измеритель иммитанса E7-25
Микропрофиль рабочих поверхностей		Профилометр Mitutoyo surfest sj-210
ТермоЭДС пробного рабочего хода	Естественная термопара «инструмент – заготовка»	Цифровой осциллограф Velleman PCS500

Экспериментальная оценка свойств режущего инструмента – обсуждение

Измерения микропрофиля поверхности сменных режущих пластин выявили существенный разброс значений шероховатости. Диапазон колебаний значений среднеарифметического отклонения профиля Ra превысил 140 %. Фактическое значение параметра превысило заявленное производителем (Ra 0,4 мкм) более чем в 2 раза. Установлено, что морфология поверхности режущих пластин не позволяет в полной мере компенсировать разброс количественных значений параметров шероховатости, в том числе и при дополнительном плазменном воздействии на поверхность пластины [6].

Исследование динамики изменения температуры α и теплопроводности λ режущих пластин (рис. 4) выявило существенную вариабельность (~ 20 %) значений. Проведенные исследования относятся к разрушающим методам контроля [10].

Электрическое сопротивление промежуточного слоя оксида алюминия, как при обычных условиях, так и при температурах, соответствующих чистовой и получистовой обработке, существенно превышает удельное сопротивление материалов внешнего (TiN) и внутреннего (Ti[CN]) слоев износостойкого покрытия. Существенная неоднородность результатов измерения (варьирование превышает кратность два) и

значительная величина относительной погрешности (до 90 % для пластин группы обрабатываемости M и до 35 % для группы обрабатываемости S) не позволяют использовать данную характеристику для надежной оценки свойств режущих пластин.

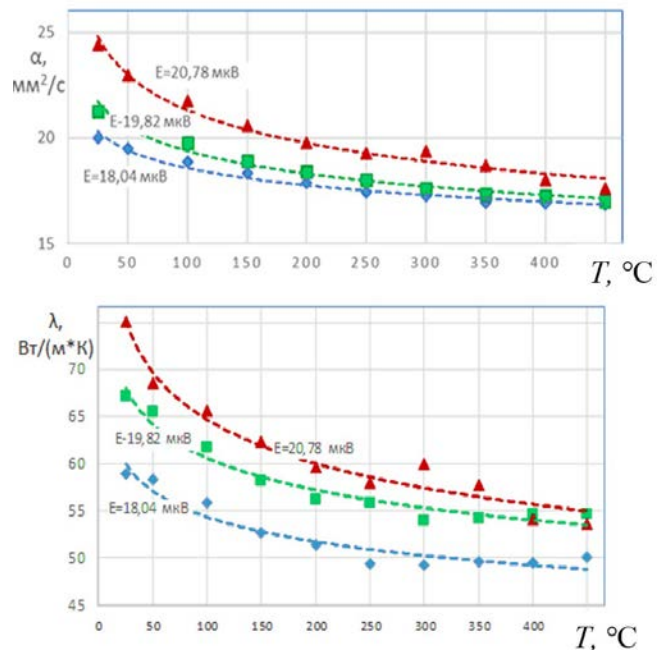


Рис. 4. Зависимость теплофизических характеристик твердосплавного инструмента с покрытием от температуры и термоЭДС пробного рабочего хода

Fig. 4. Dependence of the thermal and physical characteristics of a coated carbide tool on the temperature and thermal EMF of the test stroke

В результате стойкостных испытаний выявлена достаточно сильная корреляция (рис. 5) между периодом стойкости и величиной термоЭДС, генерируемого естественной термопарой «инструмент – заготовка» в режиме пробного рабочего хода.

Металлографические исследования поверхностного слоя (см. рис. 3) твердосплавных пластин выявили неоднородность и непостоянство размеров износостойких покрытий, структуры твердосплавной матрицы, а также наличие внутренних дефектов в ее объеме в виде микротрещин и полостей между твердосплавной матрицей, износостойким покрытием и его отдельными слоями.

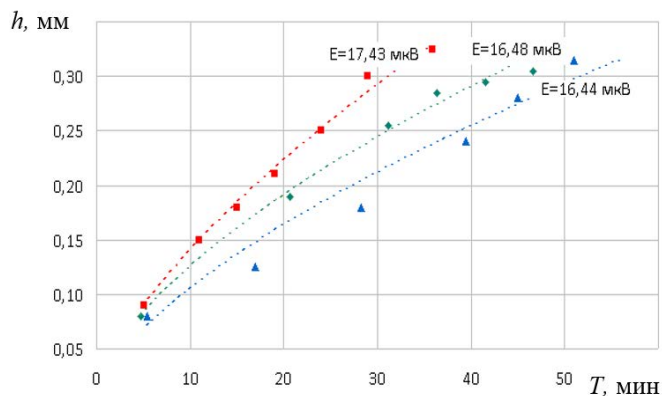


Рис. 5. Интенсивность изнашивания твердосплавного инструмента:
группа обрабатываемости S; режимы: $t = 0,5$ мм; $s = 0,3$ мм/об; $v = 80$ м/мин

Fig. 5. The wear rate of the carbide tool:
machinability group S; modes: $t = 0,5$ mm; $s = 0,3$ mm/rpm; $v = 80$ m/min

Выявленные дефекты относятся к несовершенству технологии изготовления режущего инструмента, являются причиной разброса физико-механических характеристик, напрямую влияют на режущие способности инструмента, что подтверждается существенным разбросом периода стойкости, установленного в результате стойкостных испытаний [15]. Сложное многофакторное взаимодействие в процессе резания ограничивает надежность и достоверность прогнозирования стойкости инструмента.

Управление процессами обработки в современном производстве

Как уже отмечалось ранее, при технологической подготовке во внимание принимаются не только стойкость режущего инструмента, определяющая длительность его работы и объем произведенных изделий, но и надежность обеспечения заданных технических требований. Повышение эффективности обработки требует внесения определенных корректировок как на этапе технологической подготовки, так и непосредственно при выполнении технологической операции, что определяет актуальность и практическую значимость задачи диагностики и мониторинга состояния, режущего инструмента.

В условиях автоматизированного производства с высокой долей технологического оборудования с ЧПУ широко применяются различные системы контроля геометрических параметров режущего инструмента, облегчающие точную настройку оборудования, такие как Renishaw™ или Hexagon™. Подобные системы позволяют фиксировать изменение размеров инструмента в результате износа, учитывать соответствующие коррекции в ЧПУ, а при наличии циклов автоматического измерения и подключения реляционной базы данных расширяют возможности адаптации оборудования. Однако следует отметить, что, в данном случае, фиксируется изменение только геометрических параметров, без учета физико-механических характеристик инструмента и закономерностей процесса резания, но, тем не менее, такой подход может рассматриваться как определенное приближение к «цифре». Стохастическая вариабельность фактических характеристик режущего инструмента (рис. 3) вызывает необходимость именно оперативной диагностики технологической системы [11].

Наиболее популярными информационными каналами диагностики и мониторинга состояния режущего инструмента являются тензометрические измерения составляющих силы резания, эффективной мощности резания и мощности по отдельным приводам, измерения вибраций, акустическая эмиссия.

Подобные системы интегрированы в станочные ЧПУ, но предназначены только для сигнализации и предотвращения аварийных ситуаций, и не реализуют полноценного адаптивного управления. Некоторые [3, 12] реализованы в качестве лабораторных стендов или прототипов, но не нашли широкого применения в производственных условиях.

Основными барьерами промышленной реализации подобных систем являются стохастическая природа математических моделей, положенных в основу алгоритмов управления, необходимость наработки значительного объема баз данных, а также сам характер процесса резания, ограничивающий возможность полноценной работы измерительных систем в зоне обработки.

В качестве одного из направлений повышения точности и надежности прогнозирования в условиях цифрового производства рассматривается применение нейронных сетей, которые призваны дополнить результаты регрессионного анализа, преодолеть физическую несогласованность в традиционных подходах к прогнозированию работоспособности инструмента [13]. Отметим, что применение нейронных сетей сопровождается серьезными проблемами. В первую очередь это зависимость от программного и аппаратного обеспечения. Необходимость обработки больших объемов информации требует высокого быстродействия и, следовательно, существенных вычислительных мощностей. Во-вторых, требуются сложные рекурсивные алгоритмы, длительные процедуры подбора рациональной структуры нейросети и большое время обучения. Генерация результатов на основе некоторого опыта в режиме «черного ящика» на практике затрудняет оценку достоверности и внесение изменений. Результаты расчетов с использованием AI (искусственный интеллект и нейросети обычно рассматриваются как синонимы), также, как и традиционные методы прогнозирования, имеют вероятностный характер, а значит, не избавлены от недостатков статистического анализа. Добавим, что результаты нейросетевого прогнозирования чрезвычайно

чувствительны к достоверности исходной информации. В то же время, надежность исходной информации чаще всего рассматривается специалистами в области искусственного интеллекта, как понятие, производное от релевантности (частоты упоминаний) [14], что не может считаться корректной оценкой достоверности и значимости. Таким образом, технология нейросетей не отменяет необходимости анализа сложного взаимодействия в процессе резания, выявления степени влияния отдельных факторов и мониторинга процесса. И, отметим, расширяет информационное поле науки о резании.

Выводы

Проблема прогнозирования работоспособности и мониторинга состояния режущего инструмента имеют высокую актуальность в условиях перехода к цифровому производству.

Цифровизация машиностроительной отрасли создает возможности повышения эффективности металлообрабатывающего производства, но требует внедрения системы оценки входных параметров и мониторинга хода технологической операции. Это предполагает интеграцию теоретических знаний, лабораторных методов выборочного контроля, информационных каналов сбора информации о ходе технологических процессов, а также программно-аппаратных средств цифрового анализа и адаптивного управления.

Вариабельность свойств режущего инструмента, определяемая сложностью и неоднозначностью технологии его изготовления, отражается на результатах процесса лезвийной обработки. Математические методы прогнозирования характеризуются существенной погрешностью и могут эффективно применяться в цифровом производстве только в сочетании с системами оперативного контроля состояния элементов технологической системы и адаптивного управления процессами обработки.

Реализация перехода к полноценному цифровому производству возможна на

основе синтеза знаний о закономерностях изнашивания инструмента и формирования свойств обработанной поверхности с современными математическими методами и технологиями искусственного интеллекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Износ** – нет // Промышленные страницы Сибири. 2020. № 3 (147).
2. **Ивашенко А.П.** Методы и средства контроля состояния режущего инструмента // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-3. С. 393–396.
3. **Martinov G.M., Grigor'ev A.S.** Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems. Russ. Engin. Res. 33, 433–437 (2013). DOI: 10.3103/S1068798X13070137.
4. **Табаков В.П., Худобин Л.В.** Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем направленного выбора механических свойств слоев многослойного покрытия с учетом функциональных параметров процесса резания // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14, № 9 (165). С. 414–418. EDN XZBNNR.
5. **Локтев Д., Ямашкин Е.** Основные виды износостойких покрытий // Наноиндустрия. 2007. № 5. С. 24–31. EDN NXPGVV.
6. **Azikov N.S., Brzhozovskii B.M., Krainev D.V. [et al.]** The Influence of Low-Temperature Plasma Modification on Contact Interactions of Cutting Tools // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52, No. 4. P. 307–312. DOI 10.3103/S1052618823040040. EDN NIFAEM.
7. **Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Плешакова Е.С.** Оценивание качества поверхностного слоя рабочей части режущего инструмента по параметру микротвердости // Металлообработка. 2015. № 2 (86). С. 15–21. EDN UAVUNZ.
8. **Липатов А.А., Агапов С.И.** Влияние размера карбидных зерен на режущие свойства вольфрамкобальтовых твердых сплавов при точении стали 12X18H10T // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 9. С. 18–19. EDN НТКТАJ.
9. **Постнов В.В., Хадиуллин С.Х., Малахов Е.Н., Старовойтов С.В.** Исследование показателей, определяющих режущие свойства инструментальных твердых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. № 8(53). С. 118–125. EDN PXALAF.
10. **Chigirinskii, Yu.L., Tikhonova Zh.S., Krainev D.V.** Method for assessing the thermophysical

properties of the contact pair tool - steel workpiece // Journal of Physics: Conference Series: Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021), Gelendzhik, 31 мая-06 июня 2021. Vol. 2131. Gelendzhik: IOP Publishing, 2021. P. 052012. DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052012.URL. EDN HHKTKI.

11. **Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E.** Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019): Conference proceedings ICIE 2019, Sochi, Russia, 25–29 марта 2019. – Sochi, Russia: Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. P. 1097–1105. DOI 10.1007/978-3-030-22063-1_117. EDN YEAGZO.

12. **Jr A., Morales-Menendez R., Rodriguez C., Sucar L.** (2006). Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center. 3706–3713. 10.1109/IJCNN.2006.247386.

13. **Mohse S. & Behrooz A.** Cutting tool wear prediction in machining operations, a review. Journal of New Technology and Materials, 2022. fhal-03888252.

14. **Черепанов Н.В., Буслаев С.П.** Проблемы и задачи развития искусственного интеллекта на машиностроительном предприятии // Инновации и инвестиции. 2021. № 7. С. 175–179. EDN GDPPMK.

REFERENCES

1. No wear // Industrial pages of Siberia. 2020, no. 3 (147).
2. Ivashchenko A.P. Methods and means of cutting tool state control // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2015, no. 12-3, pp. 393–396.
3. Martinov G.M., Grigor'ev A.S. Diagnostics of cutting tools and prediction of their life in numerically controlled systems. Russ. Engin. Res. 33, 433–437 (2013). DOI: 10.3103/S1068798X13070137
4. Tabakov V.P., Khudobin L.V. Improving the performance of a carbide tool by directional selection of the mechanical properties of layers of a multilayer coating, taking into account the functional parameters of the cutting process // Hardening technologies and coatings. 2018, vol. 14, no. 9 (165), pp. 414–418. EDN XZBNNR.
5. Loktev D., Yamashkin E. The main types of wear-resistant coatings // Nanoindustria. 2007, no. 5. pp. 24–31. EDN NXPGVV.
6. Azikov N.S., Brzhozovskii B.M., Krainev D.V. [et al.] The Influence of Low-Temperature Plasma Modification on Contact Interactions of Cutting Tools // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2023. Vol. 52, No. 4. P. 307–312. DOI 10.3103/S1052618823040040. EDN NIFAEM.
7. Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V., Pleshakova E.S. Quality assessment of the working part surface layer in a cutting tool according to the micro-confirmation parameter // Metalloobrabotka. 2015, no. 2 (86), pp. 15–21. EDN UAVUNZ.

8. Lipatov A.A., Agapov S.I. Influence of the size of carbide grains on the cutting properties of tungsten-cobalt hard alloys when turning steel 12X18H10T // Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2004, no. 9, pp. 18–19. EDN HTKTAJ.

9. Postnov V.V., Khadiullin S.H., Malakhov E.N., Starovoitov S.V. Analysis of the key parameters of the cutting properties of instrumental hard alloys during treatment of hard materials // Vestnik Ufa State Aviation Technical University. 2012, vol. 16, no. 8(53), pp. 118–125. EDN PALAIS.

10. Chigirinskii, Yu.L., Tikhonova Zh.S., Krainev D.V. Method for assessing the thermal and physical properties of the contact pair tool - steel workpiece // Journal of Physics: Conference Series: Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021), Gelendzhik, 31 мая-06 июня 2021. Vol. 2131. Gelendzhik: IOP Publishing, 2021. P. 052012. DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052012.-URL. EDN HHKTKI.

11. Tikhonova Z., Kraynev D., Frolov E. Thermo-Emf as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019): Conference proceedings ICIE 2019, Sochi, Russia, 25–29 марта 2019. – Sochi, Russia: Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. P. 1097–1105. DOI 10.1007/978-3-030-22063-1_117. EDN YEAGZO.

12. Jr A., Morales-Menendez R., Rodriguez C. & Sucar L. (2006). Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center. 3706–3713. 10.1109/IJCNN.2006.247386.

13. Mohse S. & Behrooz A. Cutting tool wear prediction in machining operations, a review. Journal of New Technology and Materials, 2022. fahal-03888252.

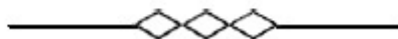
14. Cherepanov N.V., Buslaev S.P. Problems and tasks of artificial intelligence development at a machine-building enterprise // Innovations and investments. 2021, no. 7, pp. 175–179. EDN GDPPMK.

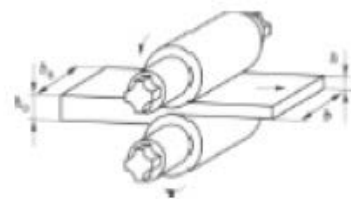
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; одобрена после рецензирования 16.04.2024; принята к публикации 22.04.2024.

The article was submitted 12.04.2024; approved after reviewing 16.04.2024; assepted for publication 22.04.2024.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6 (156). С.13-20.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P. 13-20.

Научная статья

УДК 621.7.011

doi: 10.30987/2223-4608-2024-6-13-20

Научноёмкие технологии обработки давлением в машиностроении, авиации и транспорте

Виктор Алексеевич Демин, д.т.н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

va_demin@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Представлены результаты исследований изменения толщины заготовки в результате выполнения технологических операций листовой штамповки, таких как: гибка труб, обжим, обтяжка, вытяжка, вытяжка с утонением. Необходимость таких работ связана с тем, что сегодня повышаются требования к прочности деталей, получаемых листовой штамповкой. Большое внимание уделено гибке труб, т. к. при изгибе меняется не только форма сечения трубной заготовки, но происходит уменьшение толщины в растянутом слое и увеличение толщины в сжатом. Предложены способы уменьшения разнотолщинности трубы. Приведены результаты исследований изменения толщины заготовки при вытяжке. Показано, что увеличение радиуса пуансона, может уменьшить разнотолщинность на 10 %. В большинстве исследований посвященных листовой штамповке не учитывается разнотолщинность исходной заготовки, проката, а толщина исходной заготовки при заказе металла нормальной точности может изменяться на 20 %. Выполнено моделирование толстолистовой вытяжки в программе AutoForm с целью определения возможности программы в прогнозировании изменения формы детали и толщины из-за действия изгибающих моментов. Показано, что AutoForm достаточно хорошо моделирует форму детали после штамповки. По утонению AutoForm и эксперимент показали близкие результаты по толщине и участки с минимальной толщиной. Для выбранных параметров штамповки минимальная толщина наблюдается в месте перехода цилиндрической поверхности в радиус пуансона и в месте перехода радиуса пуансона в доннышко. Так как большинство металлов, подвергаемых листовой штамповке, обладают свойствами анизотропии, экспериментально и теоретически доказано, что толщина может существенно меняться по периметру. Было доказано, что разнотолщинность по периметру детали может быть более 35 %.

Ключевые слова: листовая штамповка, изменение толщины, гибка трубы, вытяжка

Для цитирования: Демин В.А. Научноёмкие технологии обработки давлением в машиностроении, авиации и транспорте // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 13–20 doi: 10.30987/2223-4608-2024-13-20

Pressing Hi-Techs in mechanical engineering, aviation and transport

Viktor A. Demin, D. Eng.
Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, Russia
va_demin@bk.ru

Abstract. Results of workpiece thickness variations due to sheet metal stamping job, that is: tube bending, pressing, stretching, drawing-out, ironing are presented in the paper. The necessity in such work is fuelled by the contemporary increasing requirements for parts strength resulted from sheet metal stamping. Much attention is paid to tube bending, for it is bending that changes not only form of the section of the tube billet, but also leads to a thickness loss in a tensile layer together with an increase in thickness of a compression zone. The methods of reducing tube thickness variation are proposed. Results of changes in workpiece thickness under drawing-out are given. It is shown that increasing the punch radius can reduce the thickness variation by 10 %. In most studies on sheet stamping, the thickness of the primary blank and rolled iron is not taken into account, while the primary part thickness can vary by 20 % when ordering metal of single precision. A thick-sheeted drawing-out in the AutoForm program is simulated in order to determine the possibility of the program in predicting changes in the shape of the sheet and thickness due to the action of bending. It is shown that AutoForm models the shape of the part well enough after stamping. According to the specification, AutoForm and the experiment showed similar results in thickness and also revealed areas with minimal thickness. For the selected stamping parameters, the minimum thickness is observed at the point of transition of the cylindrical surface to the punch radius and at the point of transition of the punch radius to the bottom plate. Since most metals subjected to sheet stamping have anisotropy properties, it has been shown by experiments and has its theoretical proof that thickness can vary significantly along the perimeter. It has been proven that the thickness variation along the perimeter of the part may exceed 35 %.

Keywords: sheet stamping, thickness variation, tube bending, drawing-out

For citation: Demin V.A. Pressing Hi-Techs in mechanical engineering, aviation and transport / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 13–20. doi: 10.30987/2223-4608-2024-13-20

В настоящее время в машиностроении, авиации и транспорте широко применяются детали, получаемые из листового материала листовой штамповкой, к которым, последнее время, предъявляются повышенные требования по надежности заготовок. Надежность или прочность заготовки зависит, в основном, от толщины и прочности материала, которая, как правило, характеризуется временным сопротивлением σ_B .

В дальнейшем, для наглядности, будем рассматривать сталь 08, как наиболее часто применяемую в листовой штамповке.

В справочниках временное сопротивление задается в очень широких пределах. Например в справочнике [1] величина $\sigma_B = 280...400$ Н/мм², а в справочнике [2]

$\sigma_B > 300$ Н/мм². Измерения показывают, что в одной партии металла σ_B может изменяться в пределах 70 Н/мм², по европейским требованиям эта величина не превышает 50 Н/мм².

В тоже время по ГОСТ 16523-97 «Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия» колебания σ_B зависят от группы прочности, табл. 1.

В соответствии с ГОСТ 9045-93 «Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки» для стали 08 в зависимости от группы штампуемости имеет следующие значения σ_B , представленные в табл. 2. Из нее видно, что σ_B может изменяться на 56 %.

1. Изменение временного сопротивления по ГОСТ 16523-97

1. Break point stress changing as per GOST standard 16523-97

Группа точности	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²
K260B	260...380
K270B	270...410
OK300B	300...480
K310B	310...440
K330B	330...460
K350B	350...500

2. Изменение временного сопротивления по ГОСТ 9045-93

2. Change in time resistance as per GOST standard 9045-93

Способность к втяжке	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ²
ОСВ	250...350
СВ	250...380
ВГ	250...390

Так как прочность материал задается конструктором, а для штамповки прочностные характеристики необходимы только для определения силы штамповки и соответственно для выбора кузнечно-штамповочного оборудования большинство работ посвящено изменению толщины в процессе штамповки. В этом плане характерна работа [3], в которой выполнено моделирование в программе QFORM горячей листовой штамповки детали получаемой вытяжкой. В результате расчета технологического процесса

удалось уменьшить разнотолщинность получаемой детали.

В действующем производстве к расчетной толщине добавляют 15 % металла, для компенсации утонения. Снижение увеличения толщины позволило снизить себестоимость продукции, за счет уменьшения нормы расхода металла и одновременно увеличить стоимость изделия, т. к. детали с меньшей разнотолщинностью стоят дороже.

В работе [4] авторами рассмотрен вопрос изменения толщины стенки трубы при гибке по копиру. В результате аналитического решения с использованием вариационных методов механики твердого деформированного тела, получены аналитические зависимости разнотолщинности от отношения R_0/d , где R_0 – радиус оси изгибаемой трубной заготовки; d – диаметр трубы. Однако отношение R_0/d задается конструктором, и технолог не в состоянии его поменять. Поэтому полученное решение актуально для прогнозирования возможной разнотолщинности и появляется возможность заранее увеличить толщину трубной заготовки для обеспечения заданной минимальной толщины трубы.

Статья [5] посвящена формообразованию крутоизогнутых отводов из трубной заготовки. По существующей технологии разница по толщине между зоной сжатия и зоной растяжения превышает 30 %. Авторы предлагают проводить дополнительную операцию калибровки и провели математическое моделирование последовательного деформирования трубной заготовки в ANSYS/LS-DYNA. Это позволило получить разнотолщинность менее 24 %.

Интересно представление результатов расчета. Вместо расчета при номинальных значениях технологических и конструктивных параметров, было построено уравнение регрессии и построены графики изменения толщины по сечению с учетом колебания технологических

и конструктивных параметров. Один из таких графиков представлен на рис. 1.

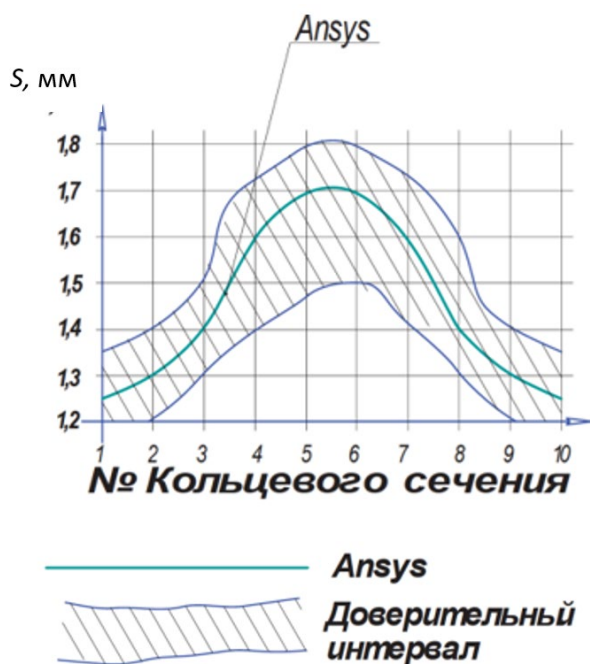


Рис. 1. Изменение толщины по кольцевому сечению

Fig. 1. Thickness variations along the annular section

В литературе имеются работы по совмещению различных операций листовой штамповки для получения изделий с минимальной разнотолщиной. Так в работе [6] предлагается за счет последовательного выполнения операций вытяжки, вытяжки с утонением и обжима, получать деталь с практически одинаковой толщиной. Суть метода заключается в том, что на участке, где будет проходить обжим, вытяжкой с утонением в конической матрице формируется участок с переменной толщиной (рис. 2). После обжима толщина на этом участке увеличивается, и разнотолщинность не превышает 2,2 %.

В работе [7] рассмотрен процесс совмещения операций вытяжки, обжима, раздачи. Особое внимание уделено влиянию трения. Показано, что с увеличением коэффициента трения в диапазоне от 0,15 до 0,36 может происходить увеличение разнотолщинности от 16 до 29 %. Также исследовано увеличение толщины

исходной заготовки в зависимости от коэффициента раздачи.

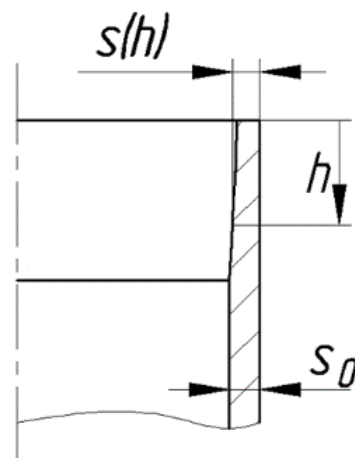


Рис. 2. Осесимметричная деталь после вытяжки с утонением

Fig. 2. Axisymmetric part after ironing

Интересный подход к исследованию поперечной разнотолщинности заготовки предложен в работе [8]. Разнотолщинность выражена в эквивалентной квадратичной форме, соответствующей гауссовым параметрам поверхности. Предложен критерий минимального изменения толщины в процессе обтяжки оболочки двойной кривизны.

В результате получены условия, при которых можно получить направленное изменение толщины заготовки, что особенно актуально в авиастроении.

На сегодняшний день достаточно много работ посвящено изменению толщины при вытяжке осесимметричных деталей. Так в работе [9] анализируется изменение толщины стенок цилиндрических стаканов при вытяжке без прижима. Анализ процесса вытяжки проведен с предположением, что образующая стенки стаканчика изгибается и сверткой получает готовое изделие.

Рассмотрены два случая: пуансон имеет плоское основание; штамповка пуансоном по форме близким к сфере. Расчетная схема показана на рис. 3.

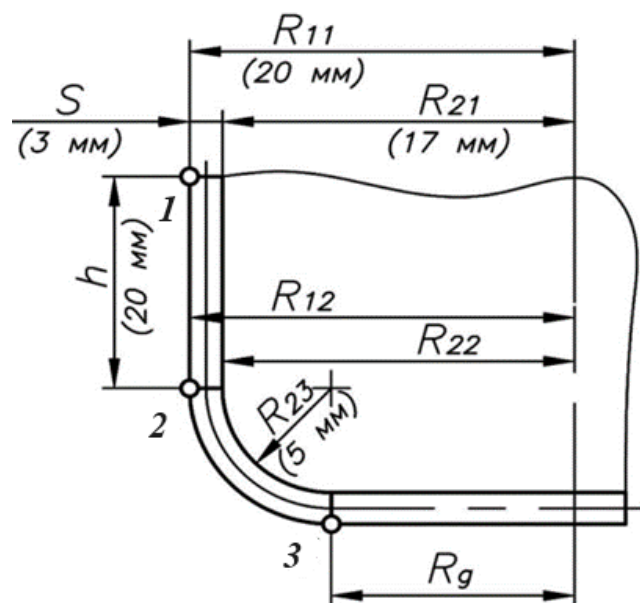


Рис. 3. Сечение осесимметричной цилиндрической детали

Fig. 3. Section of an axisymmetric cylindrical part

По первой схеме минимальная толщина находится в точке 2 и материал под пуансоном практически не деформируется. По второй схеме увеличивается очаг пластической деформации, минимальная толщина детали смещается к точке 3. Показано, что разнотолщинность в этом случае уменьшается на 10 %.

Штамповка полусферы из тонкостенной листовой заготовки рассмотрена в работе [10]. Для решения поставленной задачи использовалась мембранная теория жесткопластических оболочек при условии пластичности Мизеса. Учитывалось изменение толщины и упрочнение металла. Интегрирование уравнений равновесия выполнялось с использованием формул Рунге-Кутты второго порядка. Расчетная схема показана на рис. 4.

В результате автором на основе разработанной математической модели процесса удалось получить изменение толщины металла вдоль образующей с максимальной разнотолщинностью в 12 %.

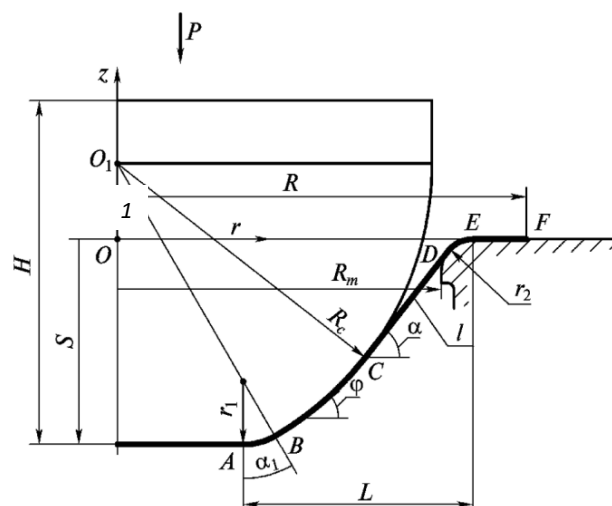


Рис. 4. Расчетная схема глубокой вытяжки сферической детали

Fig. 4. Calculation scheme of deep drawing of a spherical part

На окончательную толщину изготовленной детали существенное влияние оказывает исходная разнотолщинность заготовки.

В соответствии с ГОСТ 19904-79 «Прокат листовой холоднокатаный» предельные отклонения по толщине при ширине проката до 100 мм включительно для толщины проката от 0,9 до 1,2 мм не должны превышать:

- высокая точность $\pm 0,05$;
- повышенная точность $\pm 0,08$;
- нормальная точность $\pm 0,10$.

Таким образом, толщина исходной заготовки при получении металла нормальной точности может изменяться на 20 %.

В процессе штамповки листовой материал может значительно изменять свою толщину. Поэтому на деталях, получаемых из листовых заготовок, не рекомендуется указывать толщину металла, она указывается в угловом штампе в виде: Лист $\frac{11-1,0 \times 1000 \times 2000 \text{ ГОСТ } 19904-74}{1-\text{м}-\text{ОСВ}-0810 \text{ ГОСТ } 9045-80}$, где указано, что заказывается лист из стали 08Ю, толщиной 1,0 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм, повышенной точности, особо высокой отделки поверхности, матовая поверхность, особо сложная вытяжка.

Для анализа прочности колпачка воспользуемся рис. 1. В точке 1 толщина

увеличивается, и может достигать $S = 1,2S_0$, где S_0 – начальная толщина заготовки. В точке 2 толщина уменьшается и может достигнуть величины $S = 0,8S_0$.

Таким образом, конструктор рассчитывает, что данная деталь может выдержать силу P , а за счет уменьшения толщины и σ_b предельная нагрузка может быть уменьшена на 30 %.

Кроме этого, происходит увеличение веса изделия. На одном из авиационных заводов производят штамповку корпуса, по конструкторским расчетам требуется металл толщиной 2 мм, реально штампуют из листа толщиной 3 мм, для того чтобы обеспечить заданную толщину в опасном сечении. Такое существенное утонение вызвано, скорее всего, действием моментов. Поэтому было проведено исследование точности моделирования влияния моментов на форму детали и изменение толщины. Моделирование провели в программе AutoForm.

Заготовка и инструмент имели следующие размеры: толщина $S = 1,8$ мм; диаметр заготовки $D_z = 67,8$ мм; диаметр пуансона $d_{\text{п}} = 38$ мм; диаметр матрицы $D_m = 44$ мм; радиус скругления на пуансоне и матрицы $R_m = 2,5$ мм; шаг измерения утонения – 2 мм.

Форма отштампованного перехода близка к расчетной, что видно из рис. 5.

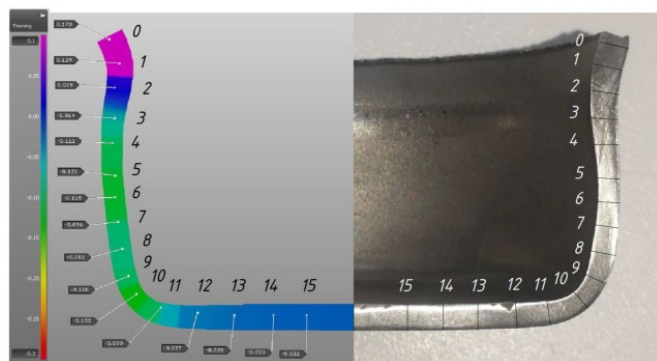


Рис. 5. Сравнение формы расчетной и экспериментальной детали

Fig. 5. Comparison of the shape of the calculated and experimental part

Распределение толщины металла, полученное экспериментально и в эксперименте показано на рис. 6. Максимальное утонение наблюдается в месте перехода цилиндрической поверхности в радиус пуансона и в месте перехода радиуса пуансона в доньшко. Таким образом, максимумы утонения наблюдаются в месте действия изгибающих моментов.

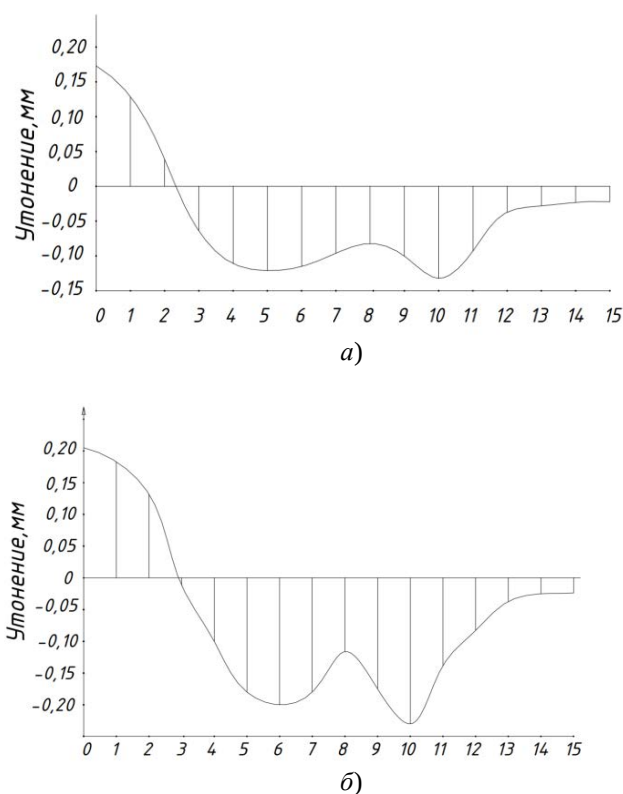


Рис. 6. Изменение толщины металла по образующей: а – AutoForm; б – эксперимент

Fig. 6. Thickness variations in the metal along generatrix: а – AutoForm; б – experiment

При проектировании процессов вытяжки цилиндрических деталей необходимо учитывать изменение толщины по периметру заготовки. На рис. 7 показано характерное сечение, в котором появляется максимальная разнотолщинность. Теоретически и экспериментально получено, что максимальная разнотолщинность может быть более 35 %.

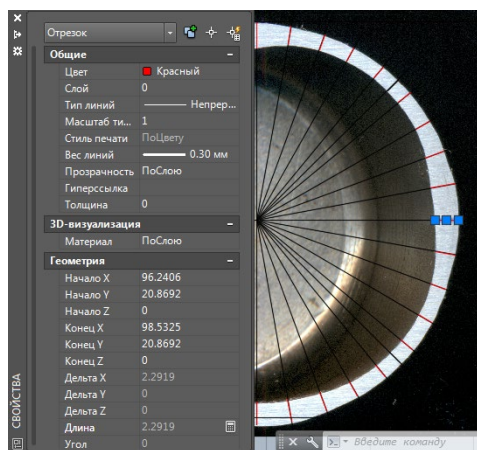


Рис. 7. Изменение толщины заготовки по периметру детали

Fig. 7. Changing the thickness of the workpiece around the perimeter of the part

Закключение

1. На разнотолщинность деталей, получаемых листовой штамповкой, существенное влияние может оказывать допуск на толщину листового проката.

2. Перспективным направлением в листовой штамповке может быть снижение разнотолщинности, в отдельных случаях, это приводит к уменьшению себестоимости и увеличению стоимости штампуемых деталей.

3. Необходимо учитывать изменение толщины по периметру детали, которая может превышать 35 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1979. 728 с.
2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
3. Демин В.А. Интенсификация горячей листовой штамповки днищ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14
4. Вдовин С.И., Лунин К.С., Мальцев Д.Н. Утонение стенки трубы при гибке по копиру // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 3 (299). С. 57–60.

5. Попов И.П., Маслов В.Д., Попов А.Д., Ниженко К.А. Направленное изменение толщины заготовки при формообразовании крутоизогнутых отводов. В сборнике: МЕТАЛЛОФИЗИКА, МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ, НАНОСТРУКТУР И ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ. МЕТАЛЛДЕФОРМ - 2009. Труды 3-й МНТК. В 2 т. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. 2009. С. 221–226.

6. Кайбаров А.П., Евсюков С.А. Исследование процесса обжима трубной заготовки с получением постоянной толщины стенки // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. Т. 19. № 8. С. 362–364.

7. Евсюков С.А., Сулейман А.А. Исследование совмещенной операции вытяжки с обжимом и раздачей // Наука и образование: Научное изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 11. С. 17–24. DOI: 10.7463/1113.0636247

8. Михеев В.А. Направление изменения толщины заготовки при формообразовании обтяжкой оболочкообразующих оболочек двойной кривизны // В сб. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» / Труды МНТК. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва. 2003. С. 158–164.

9. Кохан Л.С., Шульгин А.В., Крутина Е.В., Морозов Ю.А. Изменение толщины стенок цилиндрических листовых изделий при вытяжке без прижима // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 5. С. 9–13.

10. Непершин Р.И., Прусаков М.А. Моделирование глубокой вытяжки тонкостенной полусферы // Вестник МГТУ Станкин. 2016. № 1 (36). С. 14–20.

REFERENCES

1. Anuriev V.I. Handbook of mechanical engineering designer: In 3 volumes. T. 1. M.: Mashinostroenie, 1979. 728 p.
2. Romanovsky V.P. Handbook of Cold Forming. L.: Mechanical Engineering, 1979. 520 p.
3. Demin V.A. Intensification of high temperature bottom plates forming / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P.9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14

4. S.I. Vdovin, K.S. Lunin, D.N. Maltsev Tube Wall Tapering When Bending With Copying Template № 3 (299) 2013. P. 57–60.

5. Popov I.P., Maslov V.D., Popov A.D., Nikolenko K.A. Directional change in the thickness of the workpiece during the formation of steeply curved bends. V sbornike: METALLOPHYSICS, MECHANICS OF MATERIALS, NANOSTRUCTURES AND DEFORMATION PROCESSES. METALDEFORM 2009. Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference. In 2 volumes. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev, Volga branch of the A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences. 2009. P. 221–226

6. Kaybarov A.P., Surkov S.A. Study of billet Reduction to Obtain Wall Thickness. Science intensive technologies in mechanical engineering. 2021. T. 19 № 8. P. 362–364.

7. Evsyukov S.A., Solaiman A.A. Study of extracting combined with swaging and distribution Science and

Education Science and Education of the Bauman MSTU # 11, November 2013 DOI: 10.7463/1113.0636247

8. Mikheev V.A. Directed change in the thickness of the workpiece when shape forming double curvature dump shells with covering In the collection: Problems and prospects for engine building development. Proceedings of the international scientific and technical conference. Ser. «Bulletin of the Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev» Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolev. 2003. pp. 158–164.

9. Kohun L.S., Shul'gin A.V., Krutina E.V., Morozov Yu.A. Hange of Thickness of Walls of Cylindrical Glasses at an Extract Without Clip Structural mechanics of engineering structures and structures, 2014, No. 5. P. 9–13 p.

10. Nepershin R.I., Prusakov M.A. Modeling of thin walled half sphere deep drawing. Vestnik MGTU «Stankin» 2016. № 1 (36). P. 14–20.

Статья поступила в редакцию 17.04.2024; одобрена после рецензирования 22.04.2024; принята к публикации 26.04.2024.

The article was submitted 17.04.2024; approved after reviewing 22.04.2024; assepted for publication 26.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6 (156). С.21-28.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P. 21-28.

Научная статья
УДК 621.983.3.539.376
doi: 10.30987/2223-4608-2024-6-21-28

Горячее деформирование корпусных заготовок в изотермических условиях

Сергей Николаевич Ларин¹, Д.Т.Н.

Юлия Вячеславовна Бессмертная², К.Т.Н.

^{1, 2} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ mpf-tula@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9063-1578>

² bessmertny@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Основное производство пустотелых изделий, имеющих периодически меняющийся внутренний профиль, заключается в мех/обработке поковок. Однако при этом велики потери металла в отход, а также несмотря на высокое качество получаемых изделий, их механические характеристики не всегда соответствуют требованиям функционирования. В узлах техники, подверженной тяжелым нагрузкам данные детали принято изготавливать из высокопрочных материалов. Ввиду сложности обработки заготовок из высокопрочных сплавов операции проводят с подогревом подвергаемой деформации зоны полуфабриката или с его полным нагревом. Перспективным является применение медленного деформирования в горячем состоянии при определенных скоростных условиях. Рассмотрен процесс формирования внутреннего рельефа на пустотелых оболочках из титанового сплава ВТ6. Данные изделия в основном используются в качестве всевозможных корпусов для нужд летательной техники и изготавливаются специальными методами машиностроения. Ввиду применения высокопрочных материалов заготовок имеются сложности с реализацией технологий. В статье выполнена оценка силовых режимов формообразования рельефа на оболочках на основе проведенного САЕ моделирования. Моделирование выполнялось в комплексе deform. Акцент в исследованиях был сделан на оценке сил деформирования и интенсивностей напряжений. Выявлено влияние степеней деформации, скоростей деформирования, геометрии пуансона на силу процесса и интенсивности напряжений. Получено уравнение регрессии для оценки сил процесса. Получены рекомендации по проектированию технологий формообразования утолщений. Установлены режимы деформирования, позволяющие добиться рациональных силовых режимов, соответственно нагрузок на инструмент, что косвенно влияет на его стойкость, а также на напряженное состояние в изделии.

Ключевые слова: выдавливание; анализ, корпусные заготовки, моделирование

Благодарности: работа выполнена в рамках гранта РНФ 23-29-00470.

Для цитирования: Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В. Горячее деформирование корпусных заготовок в изотермических условиях // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 21–28 doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

Hot forming of box-shaped material blanks under isothermal conditions

Sergey N. Larin¹, D. Eng.

Yulia V. Bessmertnaya², Ph.D. Eng.

^{1, 2} Tula State University, Tula, Russia

¹ mpf-tula@rambler.ru

² bessmertny@rambler.ru

Abstract. Core operations with hollow products, having a periodically changing internal profile, consists in the final machining of press forgings. However, at the same time, metal rejects are high, and despite the high quality of the products obtained, their mechanical characteristics do not always meet the requirements of functioning. For the equipment units, when subjected to heavy loads, the parts are usually made of high-strength materials. Due to the complexity of the work on a workpieces made of high-strength alloys, operations are carried out with heating of the deformed zone of the in-process part or with a total heating. The use of slow deformation in the hot state under certain speed conditions is promising. The process of the internal pattern formation for hollow shells made of titanium alloy VT6 is viewed. These products are mainly used as various airframes and are made using special methods of mechanical engineering. Due to the use of high-strength billet materials, there are difficulties with the mechanization of the production methods. The article evaluates force conditions for generation of geometry on the shells based on CAE modeling. The simulation was performed in the deform complex. The focus of the research was on the assessment of deformation forces and stress intensities. The influence of deformation ratio, strain rates, punch geometry on the strength of the process and stress intensity has been revealed. A regression equation to estimate the forces of the process is deduced. Recommendations on

the design of fillets forming operations have been obtained. Deformation modes aimed at achieving rational power modes, respectively, loads on the tool, which indirectly affects its durability, as well as the stress condition in the product, have been found.

Keywords: extrusion molding; analysis (study), airframes, modeling

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the RHNf grant 23-29-00470.

For citation: Larin S.N., Bessmertnaya Yu.V. Hot forming of box-shaped material blanks under isothermal conditions / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 21–28. doi: 10.30987/2223-4608-2024-21-28

Элементы узлов изделий с усилением жесткости на внутренних поверхностях при формообразовании связаны с процессами деформирования пустотелых полуфабрикатов или трубных заготовок [1 – 3]. В узлах техники, подверженной тяжелым нагрузкам данные детали принято изготавливать из высокопрочных материалов. Ввиду сложности обработки заготовок из высокопрочных сплавов операции проводят с подогревом подвергаемой деформации зоны полуфабриката или с его полным нагревом [4 – 7]. Кроме того, с нагревом заготовки возможно формирование больших силовых нагрузок на инструмент и разрушение материала заготовки. Ввиду этого необходимо поддерживать температурный режим и обеспечивать небольшие скорости деформирования. Как правило, формирование ступенчатого внутреннего рельефа на корпусах реализуют с общим нагревом непосредственно в рабочем пространстве штампа. Эскиз типовых деталей дан на рис. 1.

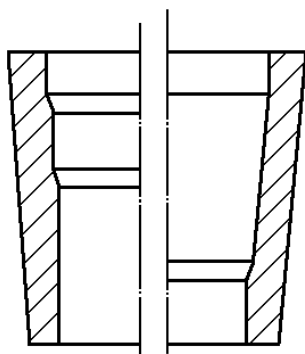


Рис. 1. Типовой эскиз внутренней поверхности деталей, формируемой при деформировании

Fig. 1. A typical sketch of the inner surface of the parts under deformation

Основное производство пустотелых изделий, имеющих периодически меняющийся внутренний профиль, заключается в мехобработке поковок. Однако при этом велики потери

металла в отход, а также несмотря на высокое качество получаемых изделий, их механические характеристики не всегда соответствуют требованиям функционирования. Перспективным является применение медленного деформирования в горячем состоянии при сложных скоростных условиях, которое позволяет значительно увеличить пластичность деформируемого металла, что позволяет достичь значительных степеней деформации и сократить затрачиваемую на операцию энергию.

Мало внимания уделяется в научно-технической литературе исследованиям напряженного и деформированного состояниям заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формообразования при деформировании корпусных заготовок в целях формирования внутреннего рельефа [8 – 11].

Выполнено моделирование операции, эскиз которой представлен на рис. 2. Набор внутренних ступенчатых утолщений на конической части заготовки производится на полуфабрикатах сплава ВТ6 при постоянной температуре 850 °С. Формирование внутреннего рельефа реализуется за счет внедрения во внутреннюю поверхность полуфабриката рабочего инструмента. Ввиду постепенного внедрения пуансона стенка полуфабриката подвергается утонению в зоне деформирующих ребер на пуансоне. При этом материал полуфабриката вытекает в полости пуансона. Таким образом реализуется набор утолщений. На рис. 2 представлен эскиз полуфабриката под операцию. Также на рисунке представлен эскиз рабочего инструмента. В процессе моделирования варьировалась скорость деформирования 5...40 мм/мин; коэффициент кантатного трения 0,3...0,7; наружный радиус полости пуансона $r_n = 117...121$ мм и высота формируемого утолщения $h = 20...45$ мм. Угол конусности $\alpha = 5^\circ$. Условием выполнения операции считалось полное заполнение выступа в пуансоне под формируемое утолщение.

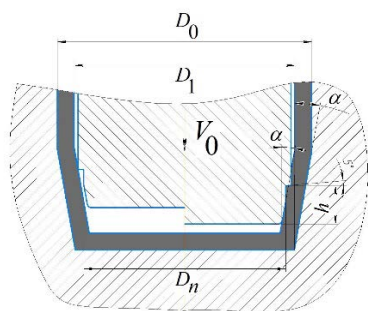


Рис. 2. Схема операции

Fig. 2. Operation diagram

Моделирование выполнялось в комплексе deform. Акцент в исследованиях был сделан на оценке сил деформирования и интенсивностей напряжений. Для чего во внутренних слоях заготовки, близких к пуансону были выбраны точки для контроля напряжений. Эскиз с оценкой размещения контрольных точек перед формообразованием и в конечной стадии процесса представлен на рис. 3.

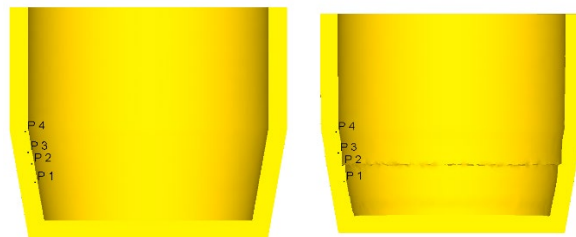


Рис. 3. Эскиз с оценкой размещения контрольных точек

Fig. 3. Sketch of estimation of control points nesting

Для выбранных точек была произведена оценка изменения интенсивности напряжений от относительной величины хода формообразующего пуансона. На рис. 4 даны графики изменения интенсивности напряжений для относительного диаметра впадины в пуансоне $\bar{r} = D_n / D_1 = 0,93$.

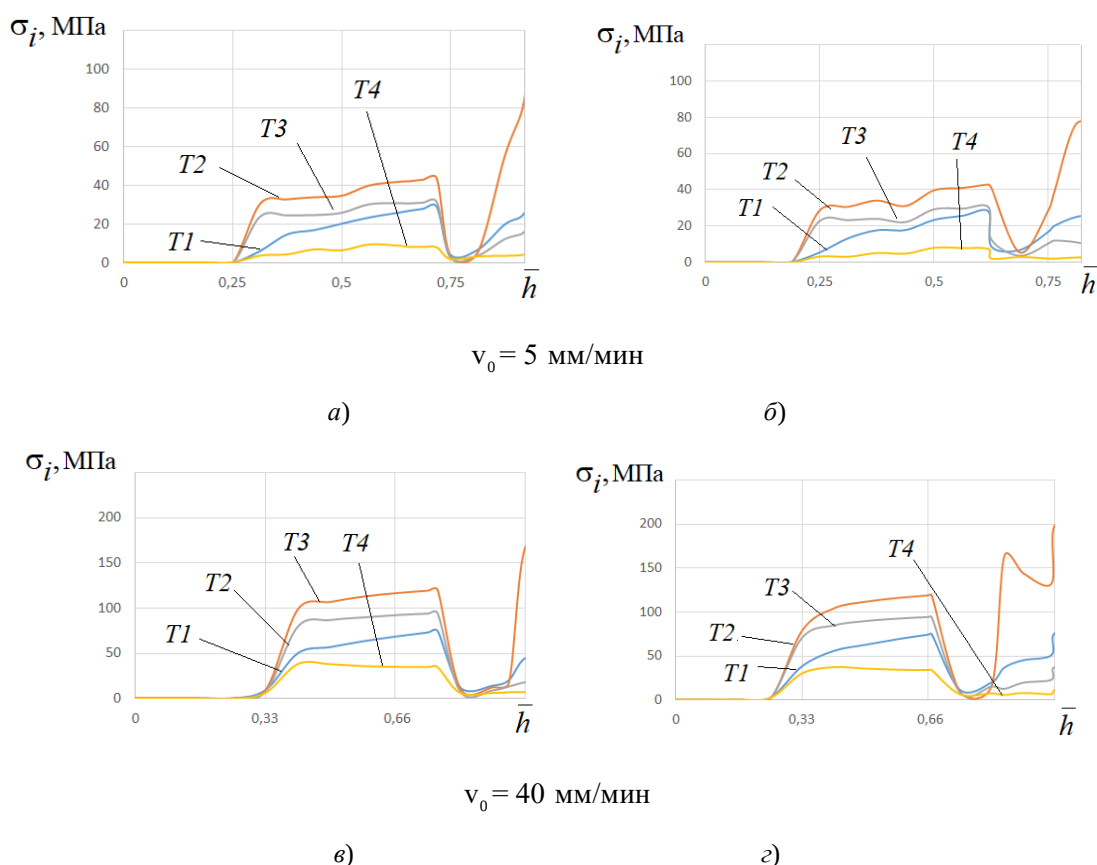


Рис. 4. Изменение интенсивности напряжений для рассматриваемых точек ($D_n/D_1 = 0,93$):
а, в – $h = 20 \text{ мм}$; б, г – $h = 45 \text{ мм}$

Fig. 4. Change in stress intensity for the points under consideration ($D_n / D_1 = 0,93$):
а, в – $h = 20 \text{ мм}$; б, г – $h = 45 \text{ мм}$

Выявлено, что рост скоростей движения формообразующего пуансона приводит к росту величины интенсивности напряжений в 2...2,5 раза. Увеличение высоты формообразуемого внутреннего выступа в основном не ведет к увеличению интенсивности напряжений в детали.

Аналогичные зависимости изменения интенсивностей напряжений для относительного диаметра впадины в пуансоне $\bar{r} = D_n / D_1 = 0,97$ представлены на рис. 5.

Анализ приведенных ниже графиков позволяет сказать о том, что изменение ширины

формообразуемого утолщения и его высоты не приводит к заметному изменению напряжений в рассматриваемых точках и соответственно в материале изделия в целом. Наибольшее влияние на интенсивности напряжений в рассматриваемом температурном интервале оказывает изменение скорости деформирования. Для меньшей ширины формообразуемого утолщения увеличение скорости деформирования приводит к росту интенсивностей напряжений в 2,5...3 раза. Таким образом обеспечение скоростей деформирования в интервале 5...20 мм/мин обеспечивает наименьшие значения интенсивностей напряжений.

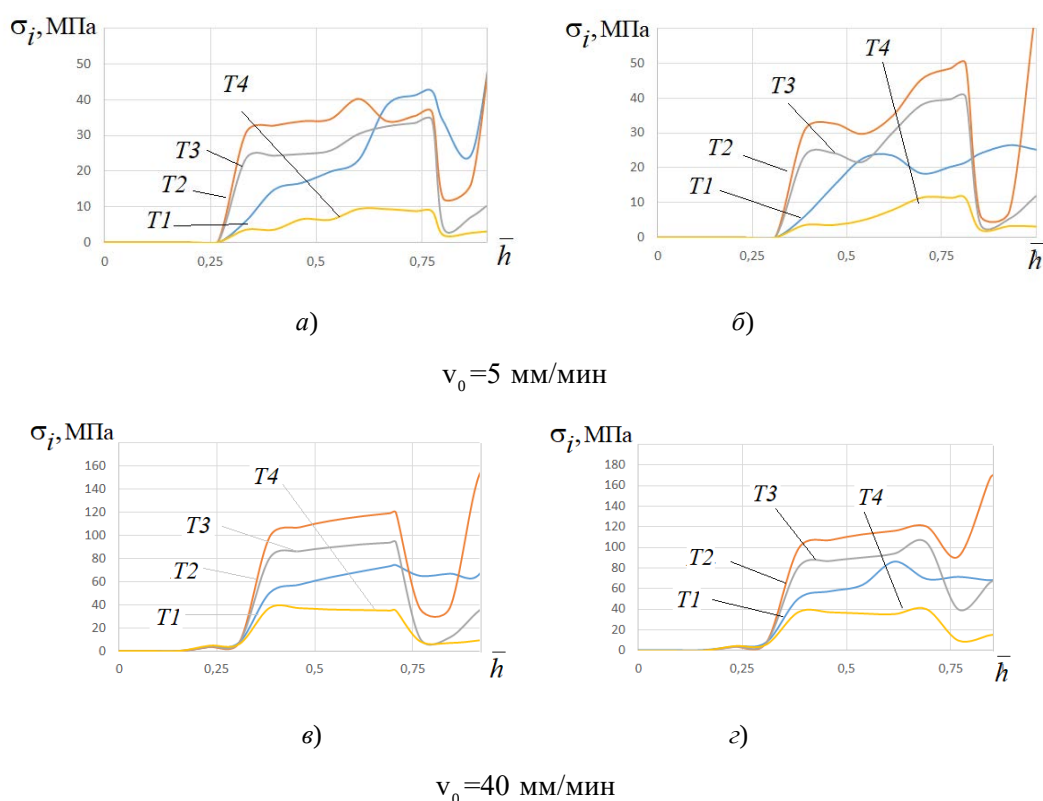


Рис. 5. Изменение интенсивности напряжений для рассматриваемых точек ($D_n/D_1 = 0,97$):

а, в – $h = 20$ мм; б, г – $h = 45$ мм

Fig. 5. Change in stress intensity for the points under consideration ($D_n/D_1 = 0,97$):

а, в – $h = 20$ mm; б, г – $h = 45$ mm

Исходя из анализа рис. 4 и 5 наиболее нагруженными являются зоны заготовки в области точек 2 и 4. Для меньшей ширины формообразуемого утолщения значения интенсивностей напряжений в интервале $\bar{h} = 0...0,75$ близки. Сам график изменения интенсивностей напряжений носит сложный характер, что связано с особенностями течения материала заготовки. Максимальной величины интенсивности напряжений для точек 2 и 3 имеют в конце хода. Для точек 1 и 4 в интервале $\bar{h} = 0...0,75$.

Выполнена оценка сил формообразования утолщения на внутренней поверхности заготовки в зависимости от степеней деформации и скоростей деформирования. На рис. 6 представлены графики изменения силы на пуансоне P в зависимости от относительного диаметра впадины в пуансоне $\bar{r} = D_n / D_1$ для высот формируемого утолщения $h = 20$ и 45 мм.

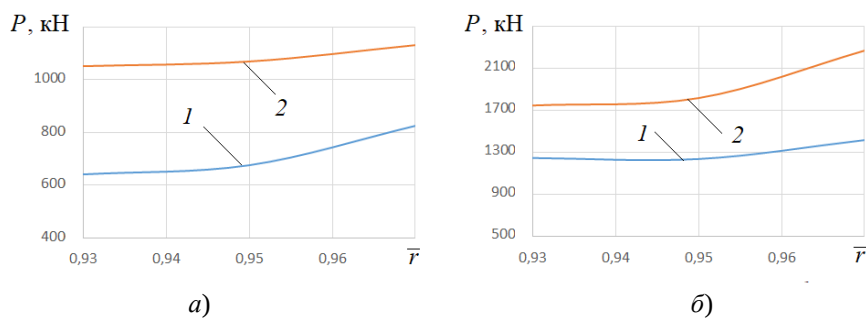


Рис. 6. Изменение силы деформирования от ширины формируемого утолщения:

$a - v_0 = 5 \text{ мм/мин}$; $b - v_0 = 5 \text{ мм/мин}$; $1 - h = 20 \text{ мм}$; $2 - h = 45 \text{ мм}$

Fig. 6. Change in the deformation force depending on the width of bulgings:

$a - v_0 = 5 \text{ mm/min}$; $b - v_0 = 5 \text{ mm/min}$; $1 - h = 20 \text{ mm}$; $2 - h = 45 \text{ mm}$

Графики (рис. 6) построены по максимальным величинам сил, возникающих в процессе формообразования. На рис. 7 даны графики изменения силы от относительной величины хода инструмента для разных величин степеней деформации и скоростей деформирования.

Установлено, что увеличение ширины формообразуемого утолщения приводит к снижению

силы деформирования на 10...20 %, что связано с частичной разгрузкой пуансона ввиду истечения металла в полость под утолщение. Увеличение высоты формируемого участка приводит к росту силы на 30 %. Рост скоростей деформирования ведет к увеличению сил штамповки на 35...50 %.

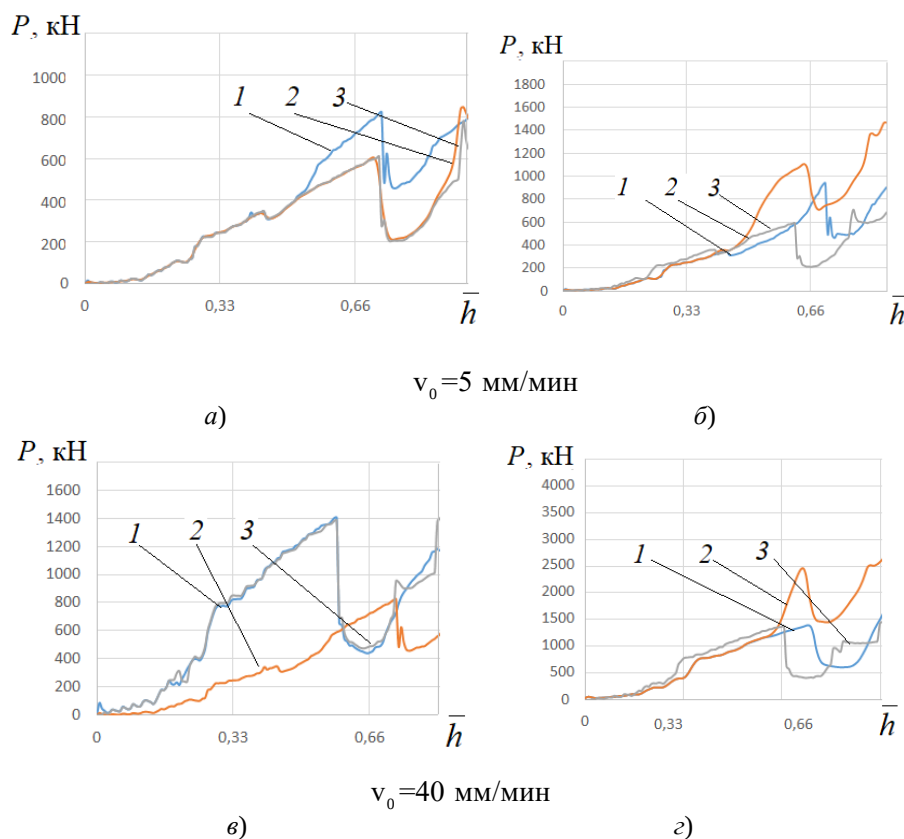


Рис. 7. Изменение силы в процессе формообразования:

$a, в - h = 20 \text{ мм}$; $б, з - h = 45 \text{ мм}$; $1 - D_n / D_1 = 0,95$; $2 - D_n / D_1 = 0,97$; $3 - D_n / D_1 = 0,93$;

Fig. 7. Force change under generation of geometry:

$a, c - h = 20 \text{ mm}$; $b, d - h = 45 \text{ mm}$; $1 - D_n / D_1 = 0,95$; $2 - D_n / D_1 = 0,97$; $3 - D_n / D_1 = 0,93$;

Полученные графики носят сложный характер. На рис. 8 представлены схемы иллюстрирующие степень заполнения полости в пуансоне на разных этапах деформирования. Данные зависимости можно условно поделить на три участка. Исходя из анализа графика видно, что на первом этапе наблюдается рост сил формообразования до момента начала

заполнения полости. Затем на втором этапе наблюдается снижение сил, что связано с активным истечением металла в полость, формируемую пуансоном. Происходит снижение нагрузки на поверхность пуансона. Затем на третьем этапе наблюдается резкий рост сил, что связано с заполнением полости и ростом гидростатического давления.

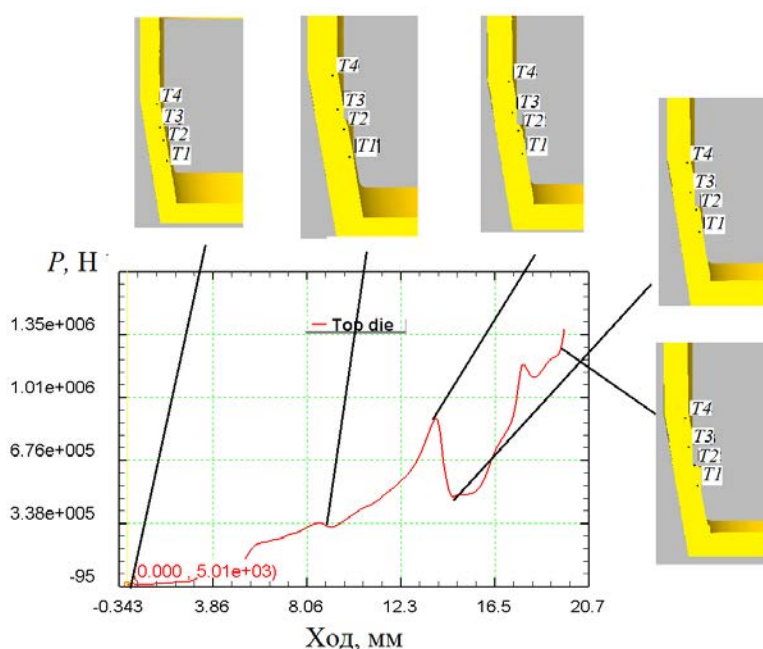


Рис. 8. Изменение силы в процессе формообразования:

$D_n / D_1 = 0,95$; $v_0 = 5$ мм/мин; $h = 45$ мм

Fig. 8. Force change under generation of geometry:

$D_n / D_1 = 0,95$; $v_0 = 5$ mm/min; $h = 45$ mm

Был проанализирован процесс формообразования изделия с внутренним рельефом посредством выдавливания из прутка за один переход. На рис. 9 представлены графики изменения силовых нагрузок для выдавливания детали из прутка при степени деформации $D_n / D_1 = 0,95$ и высоте выступа $h = 45$ мм. Данный график условно делится на процесс выдавливания и формирование утолщения на внутренней поверхности детали.

Сравнив результаты для выдавливания из прутковой заготовки с результатами, полученными в ходе моделирования при формировании рельефа на пустотелом полуфабрикате, можно сказать, что давление, оказываемое на рабочую часть пуансона (формирующую

утолщения на заготовке) при выдавливании прутка больше в 2,5 раза больше, чем при выдавливании ребер на полуфабрикате.

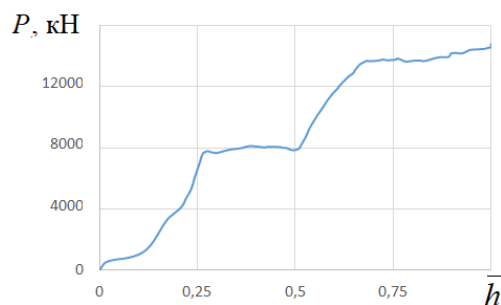


Рис. 9. Изменение силы в процессе выдавливания

Fig. 9. Force change under extrusion

Пользуясь результатами выполненных исследований, было выполнено статистическое моделирование рассматриваемой операции. Установлено, что на силу наибольшее влияние оказывают следующие факторы: скорость перемещения пуансона v_0 , мм/мин,

высота формообразуемого участка h , коэффициент трения μ .

Сформирована таблица факторного пространства для оценки сил (табл. 1) [12]. В табл. 2 дана матрица планирования [12].

1. Факторное пространство оценки силы

1. The factorial space of force estimation

Факторы				Уровни варьирования факторов		
№	Наименование фактора	Натуральное значение фактора	Кодированное обозначение фактора	$X_{i\min}$	X_{i0}	$X_{i\max}$
1	Скорость перемещения пуансона	v	X_1	5,0	22,5	40
2	Высота формообразуемого участка	h	X_2	20	32,5	45
3	Коэффициент трения	μ	X_3	0,3	0,55	0,8

2. Матрица планирования эксперимента

2. Experiment planning matrix

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	
1	+	-	-	-	660
2	+	+	-	-	1270
3	+	-	+	-	1100
4	+	+	+	-	1760
5	+	-	-	+	759
6	+	+	-	+	1447
7	+	-	+	+	1276
8	+	+	+	+	2024

Однородность оценивается с помощью критерия Кохрана (0,277). Проверка адекватности полученных моделей выполнялось с помощью критерия Фишера (0,24). По результатам статистического моделирования было получено уравнение регрессии в кодированных и натуральных значениях факторов соответственно:

$$y = 1287 + 338,25X_1 + 253X_2 + X_389,5;$$
$$P = 678,15 + 19,32v_0 + 20,42h + 358\mu.$$

Таким образом установлены режимы деформирования, позволяющие добиться рациональных силовых режимов, соответственно нагрузок на инструмент, что косвенно влияет на его стойкость, а также на напряженное состояние в изделии. Получено уравнение регрессии, позволяющее определить силу деформирования. В частности, наилучшими скоростными режимами является интервал скорости 5...20 мм/мин при температуре 850 °С.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка** и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
2. **Малинин Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов: учебное пособие для вузов. М.: Юрайт, 2022. 221 с.
3. **Яковлев С.П., Чудин В.Н. и др.** Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2003. 427 с.
4. **Гун Г.Я.** Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Metallurgia. 1980. 456 с.
5. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением М.: Metallurgia, 1986. 688 с.
6. **Теория** обработки металлов давлением / под ред. Голенкова В.А., Яковлева С.П. и др. / М. Машиностроение. 2009. 442 с.
7. **Ларин С.Н., Чудин В.Н., Пасынков А.А.** Высадка краевого утолщения на корпусах при нестационарном вязкопластическом деформировании // Цветные металлы. 2020. 7. С. 88–78.
8. **Черняев А.В., Чудин В.Н., Гладков В.А.** Изотермическое выдавливание утолщений и фланцев на осесимметричных заготовках // Заготовительные производства в машиностроении. 2021. №4. С. 164–167.
9. **Чудин В.Н.** Горячее выдавливание внутренних ступеней на корпусах // Научные технологии в машиностроении. 2018. №1. С. 10–13.
10. **Романов К.И.** Механика горячего формоизменения металлов. М.: Машиностроение, 1993, 240 с.
11. **Пасынков А.А., Ларин С.Н., Исаева А.Н.** Теоретическое обоснование схемы обратного изотермического выдавливания трубной заготовки с активным трением и вытяжкой ее краевой части // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. №10. С. 462–465.
12. **Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Лазарев А.А.** Активный статистический анализ систем с теоретическими моделями проведением машинного эксперимента // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2014. Вып. 5. С. 98–112.

REFERENCES

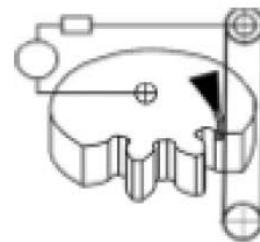
1. Forging and stamping: Reference book: in 4 vol. vol. 2. Hot stamping / Edited by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 720 p.
2. Malinin N.N. Creep in metalworking: a textbook for universities. Moscow: Yurait, 2022, 221 p.
3. Yakovlev S.P., Chudin V.N. et. al. Isothermal deformation of high-strength anisotropic materials. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 427 p.
4. Gun G.Ya. Theoretical foundations of metalworking by pressure. Moscow: Metallurgia. 1980, 456 p.
5. Kolmogorov V.L. Mechanics of pressure metal treatment. Moscow: Metallurgia, 1986, 688 p.
6. Theory of pressure metal treatment / ed. by Golenkova V.A., Yakovleva S.P. et.al. / Moscow: Mashinostroenie. 2009, 442 p.
7. Larin S.N., Chudin V.N., Pasyunkov A.A. Upsetting of edge thickening on housings under non-stationary viscoplastic deformation // Non-ferrous metals. 2020, v.7, pp. 88–78.
8. Chernyaev A.V., Chudin V.N., Gladkov V.A. Isothermal extrusion of thicknesses and flanges on axisymmetrical workpieces // Zagotovitel'nyy proizvodstva v mashinostroyeni, 2021, no. 4, pp. 164–167.
9. Chudin V.N. Hot extrusion of inner stages in housings // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018, no.1, pp. 10–13.
10. Romanov K.I. Mechanics of hot forming of metals Moscow: Mashinostroenie, 1993, 240 p.
11. Pasyunkov A.A., Larin S.N., Isaeva A.N. Theoretical substantiation of reverse isothermal extrusion scheme of pipe billet with active friction and drawing of its edge part // Zagotovitel'nyy proizvodstva v mashinostroyeni. 2020, no. 10, pp. 462–465.
12. Panfilov G.V., Nedoshivin S.V., Lazarev A.A. Active statistical analysis of systems with theoretical models for the conduct of machine experiment // Izvestiya Tula State University: Technical Sciences Series. 2014, no. 5, pp. 98–112.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 29.04.2024.

The article was submitted 27.02.2024; approved after reviewing 11.03.2024; assepted for publication 29.04.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6(156). С.29-35.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P. 29-35.

Научная статья

УДК 621

doi: 10.30987/2223-4608-2024-6-29-35

Технологические возможности применения вращающегося электромагнитного поля в металлообрабатывающем производстве

Валерий Александрович Лебедев¹, к.т.н.

Юрий Михайлович Вернигоров², д.т.н.

Анатолий Анатольевич Кочубей³, к.т.н.

Андрей Александрович Ширин⁴, к.т.н.

^{1, 2} Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

³ Таганрогский авиационный научно-технический комплекс
имени Г.М. Бериева, Таганрог, Россия

⁴ ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»,
Ростов-на-Дону, Россия

¹ va.lebidev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1838-245X>

² jvernigоров@donstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8557-3670>

³ watchbox@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ andrey.shirin.94@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0770-1072>

Аннотация. Представлены результаты исследований и направления практического применения магнитодинамического метода в металлообрабатывающем производстве на операциях упрочнения деталей, нанесения твердосмазочных покрытий, для переработки шламовых отходов шлифовального производства. Раскрыта сущность и средства технологического оснащения метода. Приведены аналитические зависимости, рекомендуемые режимы и условия выполнения магнитодинамической обработки при выполнении технологических операций. Установлено, что основным источником энергетического воздействия на объект обработки или переработки является магнитовибрирующий слой, формируемый в устройствах, создающих вращающееся электромагнитное поле и обеспечивающий технологический эффект за счет протекания в нем различных физических эффектов и интенсивного движения частиц дисперсной среды. Разработаны, с использованием устройств с вращающимся электромагнитным полем, конструкторско-технологические решения технологических систем, позволяющие с высокой технико-экономической эффективностью осуществлять: упрочнение деталей малой жесткости и большой длины, а также, деталей с труднодоступными внутренними полостями; производить переработку шламовых отходов шлифовального производства, с целью получения вторичного сырья для порошковой металлургии, инструментального и литейного производства. Показано, что магнитодинамический метод достаточно эффективен для нанесения на поверхности деталей твердосмазочных антифрикционных покрытий, который позволяет: формировать на обрабатываемой поверхности шаровидной и эллипсной формы следы ударно-импульсного воздействия инденторов, свидетельствующие об образовании смазочной пленки; уменьшить высоту микронеровностей и увеличить радиус закругления вершин выступов и истинную площадь контакта между покрытием и поверхностью металла; осуществлять сцепление покрытия по всей площади контакта индентора с металлической поверхностью; обеспечить равномерность нанесения смазочной пленки на поверхности деталей практически любой сложной формы.

Ключевые слова: вращающееся электромагнитное поле, магнитовибрирующий слой, неравноосные инденторы, упрочнение, шлифовальный шлам, разрушение конгломератов, твердосмазочное покрытие

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по гранту РФФИ в рамках научного проекта №20-38-90006; экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования НИИ «Вибротехнология» и НОЦ «Материалы» ДГТУ.

Для цитирования: Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Кочубей А.А., Ширин А.А. Технологические возможности применения вращающегося электромагнитного поля в металлообрабатывающем производстве // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 29–35. doi: 10.30987/2223-4608-2024-29-35

Technology options for rotating magnetic field when used in metalworking industry

Valery A. Lebedev¹, Ph.D. Eng.

Yuri M. Vernigorov², Ph.D. Eng.

Anatoly A. Kochubey³, Ph.D. Eng.

Andrey A. Shirin⁴, Ph.D. Eng.

^{1, 2} Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

³ Taganrog Aviation Scientific and Technical Complex
named after G.M. Beriev, Taganrog, Russia

⁴ Federal State Unitary Enterprise «Rostov-on-Don Scientific Research Institute of Radio Communications»,
Rostov-on-Don, Russia

¹ va.lebedev@yandex.ru

² jvernigorov@donstu.ru

³ watchbox@mail.ru

⁴ andrey.shirin.94@yandex.ru

Abstract. Research results and ways of applications of the electromagnetic forces method in metalworking production for the operations of parts hardening, dry-lubricant coating processes, slurry waste upgrading in grinding production, are presented. The essence and means of method techniques are revealed. Analytical dependencies, recommended modes and conditions for performing magnetodynamic treatment under technological operations are given. It is found that the main energy deposition impact factor as a target exposure for the object under treatment or waste management is a magnetically vibrating layer formed in devices that create a rotating electromagnetic field and provide an operational benefit due to the occurrence of various physical effects and the intense movement of particles of a dispersed medium. Design and technological solutions of technological systems have been developed using devices with a rotating electromagnetic field, allowing for high technical and economic efficiency to provide: hardening of slender parts having long length, as well as parts with hard-to-reach internal cavities; slurry waste management in grinding production in an attempt to obtain processed raw materials for powder metallurgy, tool and foundry production. It is shown that electromagnetic forces method is quite effective for applying dry-lubricant anti-friction coatings on the surface of parts, making it possible to form traces of shock-pulse action of indentors on the surface of the treated spherical and elliptical shape, which prove the formation of a lubricant film; allowing height reduction of the irregularities and increasing the radius of apex of salient roundness together with the true contact area between the coating and the metal surface; ensuring the adhesion of the coating over the entire contact area of the indenter with the metal surface; providing the uniformity of the application of a lubricating film on the surfaces of parts having various complex shapes.

Keywords: rotating electromagnetic field, magnetically vibrating layer, unequiaxed indentors, hardening, grinding sludge, destruction of conglomerates, dry-lubricant coating

Acknowledgements: the material was prepared as a part of scientific research under the RFBR grant within the framework of scientific project No. 20-38-90006; experimental studies were conducted using the equipment from the Research Institute «Vibrotechnology» and the Scientific Research Center «Materials» of DSTU.

For citation: Lebedev A.V., Vernigorov Yu.M., Kochubey A.A., Shirin A.A. Technology options for rotating magnetic field when used in metalworking industry / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 29–35. doi: 10.30987/2223-4608-2024-29-35

Введение

Наметившаяся, в последние годы тенденция активного развития и внедрения в технологическую практику обработки материалов электрофизических методов, предопределили создание магнитодинамического метода обработки, использующего в качестве основного источника энергии вращающееся электромагнитное поле (ВЭМП). [1]. Формируемый в рабочей зоне индуктора (рис. 1) магнитовибрирующий слой (МВС), обеспечивает с высокой интенсивностью и гибкостью технологический эффект процесса обработки [1, 2].

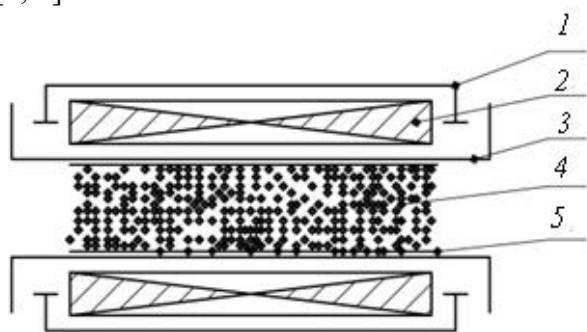


Рис. 1. Технологическая система магнитодинамической обработки:

1 – корпус; 2 – индуктор; 3 – рабочая зона; 4 – обрабатываемая среда; 5 – сменная вставка

Fig. 1. Technological system of magnetodynamic treatment:

1 – housing; 2 – inductor; 3 – working area; 4 – processing medium; 5 – replaceable insert

Основными управляющими параметрами, влияющие на производительность и качество выполняемых магнитодинамическим методом технологических процессов, являются частота вращения и напряженность электромагнитного поля, масса загрузки, размеры и магнитные свойства обрабатываемой или обрабатываемой среды.

Исследования, проведенные в НИИ «Вибротехнология» ДГТУ позволили определить направления наиболее предпочтительного практического применения магнитодинамического метода в металлообрабатывающем производстве: упрочнение деталей, переработка шламовых отходов шлифовального производства, нанесение покрытий. Несмотря на различия вышеотмеченных технологических

процессов все они могут быть реализованы в условиях одного и того типа устройства, характеризующегося простотой конструктивного исполнения и управляемостью процесса обработки. Ниже представлены особенности и практические рекомендации по технологическому обеспечению обработки магнитодинамическим методом.

Упрочняющая обработка магнитодинамическим методом

Для упрочнения деталей магнитодинамическим методом в качестве обрабатываемой среды применяют неравноосные цилиндрические инденторы из стали ШХ15, с соотношением длины к диаметру $l/d = 10$ [1, 3, 4]. В процессе магнитовибрирования инденторы, совершая хаотичное поступательно-вращательное движение, в секунду осуществляют от $10^3 \dots 10^4$ ударно-импульсных соударений с поверхностью обрабатываемых деталей, подвергая её упруго-пластической деформации. Эффективность силового воздействия инденторов на обрабатываемую поверхность зависит от массы их загрузки в рабочую зону устройства, совокупный объем которых не должен превышать $1/3$ объема рабочей зоны устройства.

Значение индукции, при котором формируется МВС, обеспечивающий технологический эффект упрочнения установлен на уровне 0,08 Тл. Увеличение индукции электромагнитного поля до 1,12 Тл приводит к повышению интенсивности процесса 1,5 раза.

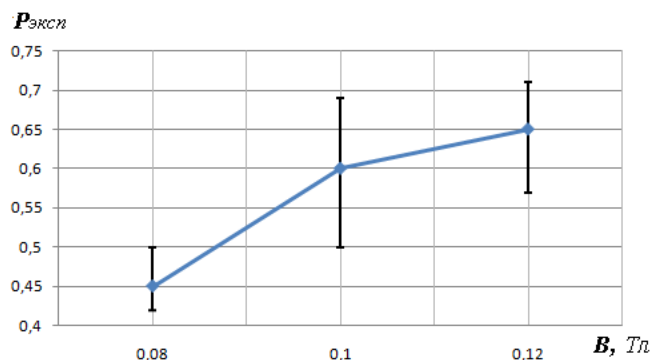


Рис. 2. Влияние индукции магнитного поля на интенсивность обработки магнитодинамическим методом

Fig. 2. Influence of magnetic field induction on the intensity of treatment using a magnetodynamic method

На основе теоретико-вероятностных представлений контактного взаимодействия инденторов с обрабатываемой поверхностью предложена формула для оценки продолжительности упрочняющей обработки деталей магнитодинамическим методом:

$$T_{\text{обр}} = \frac{i}{P \omega},$$

где i – кратность покрытия поверхности пластическими отпечатками, рекомендуется 12...14; P – интенсивность обработки, составляет 0,8...0,85; ω – угловая скорость вращения электромагнитного поля, Гц.

Экспериментально подтверждено, что продолжительность упрочнения деталей магнитодинамическим методом в пределах рабочей зоны устройства составляет 3...5 мин. При этом высота профиля обрабатываемой поверхности

достигает величины установившейся шероховатости. Твёрдость, глубина и величина остаточных напряжений увеличиваются до значений, свойственных предельному состоянию упрочнённого поверхностного слоя обрабатываемого материала [3, 4]. Дальнейшая обработка свыше 5 мин приводит к снижению этих параметров в результате перенаклёпа поверхностного слоя.

Применение устройств, реализующих магнитодинамический метод, позволяет с высокой технико-экономической эффективностью осуществлять: упрочнение деталей малой жесткости и большой длины (тонкостенные трубы, стрингеры, пояса), а также деталей с труднодоступными внутренними полостями (например: ланжерон и др.)

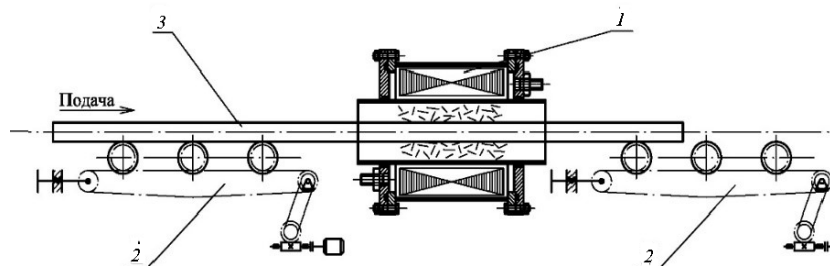


Рис. 3. Технологическая схема магнитодинамической обработки длинномерных деталей: 1 – рабочий блок устройства с ВЭМП; 2 – механизм перемещения детали; 3 – деталь

Fig. 3. Technological scheme of magnetodynamic treatment of long parts: 1 – working unit of the device with BEMT; 2 – mechanism of part moving; 3 – part

Установка проходного типа, представленная на рис. 2, по сравнению с существующими на практике дробеструйными установками, позволяет снизить материалоёмкость и энергоёмкость оборудования до 8 раз и повысить производительность обработки деталей в 1,5 раза [4].

Магнитодинамическая переработка шламовых отходов шлифовального производства

Проведённые исследования и полученные при этом результаты показали что устройства с вращающимся электромагнитным полем позволяют достаточно эффективно решить проблему разрушения и измельчения шламовых

отходов, представляющих собой, после удаления технологической жидкости, обезжиривания и сушки, смесь конгломератов различной формы, состоящих на 80 % из ферромагнитных частиц в виде металлической стружки и частиц абразива [5, 7, 10].

В основе разрушения и измельчения конгломератов и его частиц магнитодинамическим методом лежит процесс ударно-импульсного контактного взаимодействия, протекающий в условиях магнитовибрирующего слоя. Установлено, что наибольший технологический эффект разрушения и измельчения конгломератов шлама, достигается при частотах магнитного поля в пределах 50...60 Гц и загрузке их не более 35...40 % объёма рабочей зоны устройства (рис. 4).

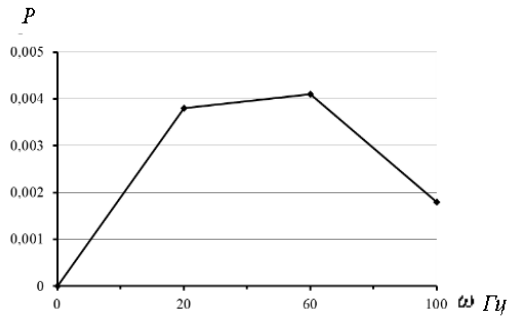


Рис. 4. Влияние частоты ВЭМП на интенсивность разрушения конгломератов шлама

Fig. 4. Influence of the EMF frequency on the intensity of destruction of sludge conglomerates

На основе законов Риттингера и Кирпичева-Кика установлены пороговые значения индукции, обеспечивающие:

– разделение магнитной и немагнитной компонент содержащихся в шламовых отходах [5]:

$$B_{вр} = 8,02 \cdot \sqrt{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi (\rho_{ч} \cdot N \cdot D_{ч} \cdot E_{адгч})^{0,5}};$$

– измельчение ферромагнитных частиц [5, 7]:

$$B_{ви} = 3,42 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{в} \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot D_{ч.к}}{Z_{и}} \cdot \pi \left[\frac{\rho_{ч}}{E} \cdot (Z_{и}^3 - 1) \right]^{0,5}},$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Н/А²; μ – относительная магнитная проницаемость; $\rho_{ч}$ – плотность ферромагнитных частиц кг/м³; $D_{ч}$ – размер абразивных частиц конгломерата, м; N – количество частиц, формирующих ферромагнитный агрегат конгломерата, соизмеримых с размером абразивных частиц; π – рад/с; $\sigma_{в}$ – предел прочности ферромагнитного агрегата и его частиц, Па; E – модуль упругости ферромагнитного материала, Па; $Z_{и} = \frac{D_{ч.и}}{D_{ч.к}}$ – степень измельчения ферромагнитного агрегата; $D_{ч.и}$, $D_{ч.к}$ – исходный размер ферромагнитного агрегата и конечный размер измельченных частиц, м.

Экспериментально подтверждена адекватность предложенных аналитических зависимостей, из которых следует, что для реализации процессов разделения конгломератов шлама на составляющие компоненты, индукция вращающегося электромагнитного поля должна быть выше 2,5 мТл, а для измельчения

ферромагнитных (стальных) частиц необходимо высоко градиентное поле с индукцией не менее 5,5 мТл.

Для оценки продолжительности процессов разрушения и измельчения рекомендованы вероятностные зависимости [7]:

$$t_p = \frac{2\pi Z_p}{P\omega}; \quad t_{и} = \frac{2\pi Z_{и}}{P\omega},$$

где P – интенсивность процесса разрушения; Z_p – среднестатистическая степень разрушения конгломератов, представляющая собой отношение масс исходных конгломератов к массе выделившихся при разрушении неферромагнитных частиц.

Конструкторско-технологическое решение технологического комплекса, реализующего разрушение, разделение и измельчение шламов шлифовального производства магнитодинамическим методом приведено на рис. 5 [5].

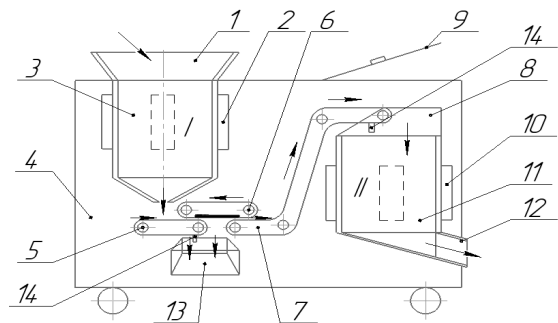


Рис. 5. Технологическая схема разделения и измельчения шламовых отходов: 1 – бункер –приемник; 2, 10 – индукторы с ВЭМП; 3, 11 – рабочая зона; 4 – корпус; 5, 7 – транспортеры ленточные; 6 – транспортер ленточный с электромагнитом; 8 – ограждающее устройство; 9 – люк; 12, 13 – склиз; 14 – щетка

Fig. 5. Technological scheme of separation and crushing of sludge waste:

1 – hopper receiver; 2, 10 – inductors with BEMT; 3, 11 – working area; 4 – housing; 5, 7 – belt conveyors; 6 – belt conveyor with electromagnet; 8 – fence; 9 – hatch; 12, 13 – slide; 14 – brush

Комплекс, имея малые габаритные размеры (1200x400x500 м), позволяет автономно полностью автоматизировать процесс переработки шламов с производительностью 0,8...0,9 кг/мин при индукции магнитного поля 8,5 мТл и частоте 60 Гц и обеспечить измельчение ферромагнитных частиц до размера 40...25 мкм. По сравнению с переработкой на базе

устройства состоящих из бильной мельницы и магнитовибрационного сепаратора комплекс позволяет повысить технико-экономическую эффективность переработки шламовых в 4 раза.

Нанесение твердо-смазочных покрытий магнитодинамическим методом

В качестве наиболее распространённых способов нанесения твердо-смазочных покрытий на основе порошкообразных материалов со слоистой структурой, широко применяемых в технологии изготовления деталей для улучшения технологических характеристик, снижения трения, в машинах, используют ручной и напыление. Существенным недостатком этих способов является низкая адгезионная прочность покрытия [9].

Механическая активация процессов нанесения покрытия путём ударно-импульсного воздействия частиц (гранул) рабочей среды в условиях виброволновых технологических системах позволяет повысить эффективность процесса и получить дополнительные технико-экономические преимущества связанные с обработкой деталей в больших количествах [6, 9]. Однако, как показали исследования, энергосиловые возможности этого метода, составляющие порядка 30...120 Н, не обеспечивают формирование на поверхности достаточно прочного покрытия. Для их повышения предлагается применить магнитодинамический метод, сущность которого заключается в следующем.

В рабочую зону устройства в определённом соотношении одновременно загружаются стальные неравноосные инденторы и среда покрытия, которая не обладает ферромагнитными свойствами (рис. 6). Под воздействием вращающегося электромагнитного поля сформированный из неравноосных инденторов магнитовибрирующий слой приводит твердосмазочную среду в псевдооживлённое состояние [8]. Одновременно протекает процесс измельчения её при попадании частиц между двумя соударяющимися инденторами. Частицы, находящиеся на поверхности детали, в результате ударно импульсного воздействия инденторов на них вдавливаются в поверхность и модифицируют поверхностный слой, изменяя его геометрические и физико-механические параметры. Эффективность протекания процесса зависит от напряжённости и градиента индукции магнитного поля.

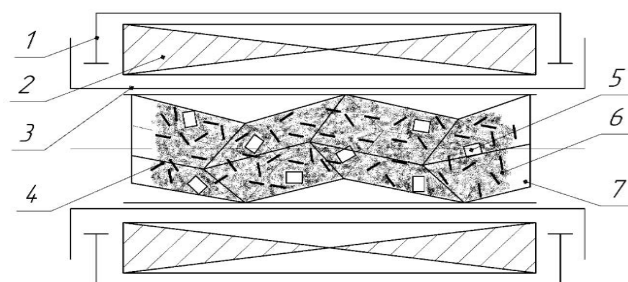


Рис. 6. Технологическая схема нанесения покрытия магнитодинамическим методом:

1 – корпус; 2 – индуктор; 3 – рабочее пространство; 4 – инденторы; 5 – обрабатываемые детали; 6 – среда покрытия; 7 – винтовой ротор

Fig. 6. Technological scheme of coating by magnetodynamic method:

1 – housing; 2 – inductor; 3 – workspace; 4 – indentors; 5 – workpieces; 6 – coating medium; 7 – screw rotor

Нанесение покрытия может осуществляться на поверхность деталей, находящихся в рабочей зоне устройства или в свободном состоянии, или в закреплённом относительно магнитовибрирующего слоя или осуществляющих относительно осевого перемещение вдоль рабочей зоны устройства. Применение винтообразного исполнения рабочей зоны устройства (рис. 6) приводит к дополнительной активации процесса перемешивания среды покрытия, и как следствие интенсифицировать процесс нанесения покрытия.

Об эффективности нанесения твердосмазочных покрытий магнитодинамическим методом свидетельствуют нижеприведённые экспериментальные результаты:

- формируемые на обрабатываемой поверхности шаровидной и эллипсной формы следы ударно-импульсного воздействия инденторов, свидетельствуют об образовании смазочной плёнки, толщина которой зависит от механического сцепления между кристаллами MoS₂ и металлом, обусловленного шероховатостью, т. е. доступной удельной поверхностью;

- уменьшается высота микронеровностей, радиус закругления вершин выступов и истинная площадь контакта между покрытием и поверхностью металла увеличивается;

- сцепление покрытия осуществляется по всей площади контакта индентора с металлической поверхностью;

- равномерность нанесения смазочной плёнки на поверхности деталей практически любой сложной формы.

Заключение

Проведённые исследования и предложенные на их основе конструкторско-технологические решения позволяют сделать вывод об эффективности и перспективности применения устройств с вращающимся электромагнитным полем в металлообрабатывающем производстве для выполнения технологических операций упрочнения деталей малой жесткости и большой длины, а также, деталей с труднодоступными внутренними полостями; для переработки шламовых отходов шлифовального производства, с целью получения вторичного сырья для порошковой металлургии, инструментального и литейного производства. Магнитодинамический метод нанесения покрытий в среде металлических тел сочетает все необходимые условия для нанесения твердосмазочных покрытий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Логвиненко Д.Д., Щеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев.: Техника, 1976. 143 с.
2. Болога М.К., Марта И.Ф. Магнитоожигение во вращающемся магнитном поле // Магнитная гидродинамика. 1988. № 3. С. 103–108.
3. Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М., Кочубей А.А. Энергетические аспекты отделочно-упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 6 (60). С. 35–42.
4. Кочубей А.А., Лебедев В.А., Вернигоров Ю.М. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле. Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2018. 135 с.
5. Лебедев В.А., Ширин А.А., Коваль Н.С., Вернигоров Ю.М. Технологическое обеспечение переработки шламовых отходов шлифовального производства с применением электромагнитного поля // Воронежский научно-технический Вестник. 2022. Т. 2. № 2 (40). С. 30–37.
6. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. 694 с.

7. Лебедев В.А., Ширин А.А., Коваль Н.С., Вернигоров Ю.М. Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем // Advanced Engineering Research. 2022. Т. 22. № 4. С. 338–345.

8. Егорова С.И. Магнитовибрационное ожигение. Ростов-на-Дону.: ДГТУ, 2009. 162 с.

9. Иванов В.В., Бабичев А.П. Вибрационные механохимические покрытия. Саарбрюкен, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 119 с.

10. Повстаной А.Ю., Рудь В.Д. Использование отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения // Устойчивое развитие. 2014. № 19. С. 159–164.

REFERENCES

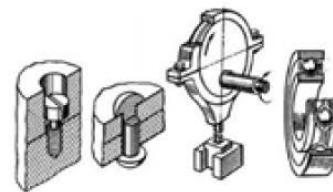
1. Logvinenko D.D., Shelyakov O.P. Intensification of technological processes in devices with a vortex layer. Kiev: Technika, 1976. 143 p.
2. Bologa M.K., Marta I.F. Magnetic fluidizing in a rotating magnetic field // Magnetic hydrodynamics. 1988, no. 3, pp. 103–108.
3. Lebedev V.A., Vernigrov Yu.M., Kochubey A.A. Power aspects of parts strengthening processing under rotating field conditions // Science intensive technologies in machine building. 2016, no. 6 (60), pp. 35–42.
4. Kochubey A.A., Lebedev V.A., Vernigrov Yu.M. Long parts hardening in the devices with rotating magnetic field. Rostov-on-Don: DSTU, 2018, 135 p.
5. Lebedev V.A., Shirin A.A., Koval N.S., Vernigrov Yu.M. Technological support for processing sludge waste of grinding production using electromagnetic field // Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2022, vol. 2, no. 2 (40), pp. 30–37.
6. Babichev A.P. Fundamentals of vibration technology. Rostov-on-Don: Publishing Center of DSTU, 2008. 694 p.
7. Lebedev V.A., Shirin A.A., Koval N.S., Vernigrov Yu.M. Study on processing grinding sludge conglomerates in devices with a rotating electromagnetic field // Advanced Engineering Research. 2022, vol. 22, no. 4, pp. 338–345.
8. Egorova S.I. Magnetovibration liquefaction. Rostov-on-Don: DSTU, 2009, 162 p.
9. Ivanov V.V., Babichev A.P. Vibrational mechanochemical coatings. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014, 119 p.
10. Povstyanoy A.Yu., Rud V.D. The use of industrial waste materials for the manufacture of constructional purposes // Sustainable development. 2014, no. 19, pp. 159–164.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 24.02.2024.

The article was submitted 14.02.2024; approved after reviewing 19.02.2024; assepted for publication 24.02.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №6 (156). С.36-48.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №6 (156). P. 36-48.

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2024-6-36-48

Адаптивное оборудование и технологическая оснастка для автоматической сборки

Михаил Владимирович Вартанов¹, д.т.н.

Нгуен Ван Линь², аспирант

^{1, 2} Московский политехнический университет, Москва, Россия

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6057-9478>

² nguyenlinh.hvktqs@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4754-1632>

Аннотация. В настоящее время промышленные роботы широко применяются для выполнения задач с контролем положения с минимальным контактом, таких как точечная сварка, покраска распылением, упаковка и погрузочно-разгрузочные работы. Однако выполнение задач сборки с высокими допусками по-прежнему представляет большую проблему для роботов из-за различных неопределенностей в отношении собираемых деталей, таких как крепления, исполнительные инструменты. Для корректировки этих погрешностей необходимо выполнение точного движения, которое называется адаптацией положения детали. Адаптации движения можно достичь путем активных или пассивных средств, а также их комбинации. Методы пассивной адаптации основаны на применении упругих и демпфирующих элементов. Конструкции спроектированы таким образом, что силы, возникающие в точках контакта деталей, корректировали ошибки их положения. Методы активной адаптации основаны на адаптивном управлении с обратной связью, когда процесс сборки и положение деталей регулируются автоматически путем измерения положения и контактных усилий. С этой точки зрения, развитие исследований и разработок привело к появлению передовых роботизированных технологий для промышленного применения. Проанализированы современные технологии роботизированной сборки, чтобы понять технологические тенденции развития промышленных роботов, выявить ограничения технологий и уточнить направления будущих исследований в этой области. В данной статье особый интерес представляют типовые операции «вал – втулка». Стратегии контроля сборки классифицируются на основе типа соединения. Подробно обсуждаются стратегии управления роботизированной сборкой и ограничения существующих технологий с целью определения будущих направлений исследований по адаптивному управлению роботизированной сборкой.

Ключевые слова: роботизированная сборка; соединение «вал-втулка»; стратегия управления; пассивная адаптация; активная адаптация

Для цитирования: Вартанов М.В., Линь Н.В. Адаптивное оборудование и технологическая оснастка для автоматической сборки // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 6 (156). С. 36–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-36-48

Adaptable system of equipment and jigging for automatic assembly

Mikhail V. Vartanov¹, D. Eng.

Nguyen V. Lin², PhD student

^{1, 2} Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

¹ m.v.vartanov@mospolytech.ru

² nguyenlinh.hvktqs@gmail.com

Abstract. Currently, industrial robots are widely used to perform position checking tasks through minimum contact, that is spot welding, spray painting, packaging and loading and unloading operations. However, performing assembly tasks with high tolerances is still a big problem for robots due to various uncertainties about assembled parts, i.e. clamp

holdings, slave tools. To correct these errors, it is necessary to have positive mobility, which is called adaptation of part position. Mobility adaptation can be achieved through active or passive means, as well as a combination of them. Passive adaptation methods are based on the use of elastic and damping elements. The structures are designed in such a way that the forces arising at the points of contact of the parts correct the errors of their position. Active adaptation methods are based on adaptive feedback control, when the assembly process and the position of the parts are adjusted automatically by measuring the position and due to contact forces. From this perspective, the expanding of research and development has led to the high robotic technologies for industrial applications. Modern technologies of robotic assembly are analyzed for better understanding of technological trends in the development of industrial robots, constraint recognition of production methods and specifying the lines of future research in this area. In this article, the typical "shaft- spacer" operations are of particular interest. Assembly control strategies are classified based on the assembly pattern. Robotic assembly management strategies and existing technologies boundary conditions are discussed in detail specifying the lines of future research in adaptable control of robotic assembly.

Keywords: robotic assembly; shaft-spacer connection; control strategy; passive adaptation; active adaptation.

For citation: Vartanov M.V., Lin N.V. Adaptable system of equipment and jiggig for automatic assembly / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 6 (156). P. 36–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-36-48

Введение

Сборка считается важным этапом жизненного цикла изделия. Производственная статистика показывает, что время, затрачиваемое на сборку, обычно занимает 20...50 % от общего времени производства, а затраты на сборку составляют около 20...30 % от общей стоимости конкретного изделия [1]. Процесс является трудоемким из-за специфики окружающей среды и жестких требований к качеству. Роботы представляют собой идеальное решение для сборочных операций и широко используются для высокоэффективного промышленного производства. Однако из-за неструктурированной и динамичной среды сборочных работ роботу-сборщику по-прежнему необходимо решить множество проблем, таких как: низкая чувствительность, высокие требования к среде сборки, плохая адаптируемость к сборке, низкая эффективность сборки и неспособность завершить сложную сборку в сложных условиях. В результате сборочный робот все еще не в состоянии полностью заменить человека при сборке. Как одна из ключевых технологий сборочных роботов, стратегия управления играет решающую роль в процессе автоматизированной сборки.

Разработка технологии совместимого управления создала условия для задач

роботизированной сборки, при которых робот может корректировать положение на определенной траектории планирования для достижения соответствия окружающей среде. Развитие технологий сенсорного обнаружения и управления также улучшило интеллектуальное распознавание сборочными роботами. Таким образом, была улучшена не только точность управления положением, но и визуальное восприятие роботов и восприятие силы, что позволило роботам лучше воспринимать внешнюю среду и адаптироваться к ней, а также улучшить процесс сборки в ходе промышленного производства. Технологические возможности сборочных роботов по-прежнему быстро развиваются. В настоящее время различные исследователи по всему миру изучают стратегии управления сборочными роботами с целью сделать сборочные роботы более гибкими, интеллектуальными и производительными.

В настоящее время сборка соединений типа «вал – втулка» (ВВ) является наиболее типовой задачей в процессах сборки, на ее долю приходится примерно 40 % от общего объема работ при сборке. Сборка ВВ характеризуется повторяемостью и монотонностью операций. Кроме того, все еще существуют проблемы контроля усилия и положения, вызванные поверхностным контактом «вал – втулка». Многие исследователи

изучали сборку валов. Кроме того, исследования по сборке ВВ важны для разработки технологии сборки роботами, что является важным и критичным. Таким образом, в данном обзоре рассматриваются стратегии управления сборкой ВВ, а также обсуждаются существующие проблемы и будущие тенденции развития технологии сборки роботами.

Анализ технологических требований к изделию и выявление сборочных задач

Процесс роботизированной сборки делится на четыре этапа: приближения, поиска,

перемещения и ориентации, как показано на рис. 1. ВВ собирается роботом в соответствии с определенными стратегиями управления. Робот оснащен датчиками изображений, усилий и состояний контакта, а обратная связь, полученная датчиками, обрабатывается и используется в замкнутом цикле роботизированного управления. Затем робот уточняет свое положение и ориентацию на основе обратной связи датчиком до тех пор, пока сборка ВВ не будет завершена. Однако трудности, с которыми сталкиваются при сборке ВВ, зависят от формы сопряжений, которые можно классифицировать на простую, сложную, микросборку, кольцевую и сборку с изгибом.



Рис. 1. Схема процесса роботизированной сборки и геометрическая классификация

Fig. 1. Diagram of the robotic assembly process and geometric classification

Применение метода пассивной адаптации

В пассивном податливом механизме робот полагается на дополнительный механизм, который генерирует естественное соответствие внешним силам, когда конечный инструмент контактирует с объектом в

окружающей среде [2, 3]. Однако устройство соответствия является пассивным. Это означает, что оно не адаптируется и не обладает способностью к самообучению. Алгоритмы искусственного интеллекта (AI) могут быть использованы вместе с пассивными устройствами соответствия для повышения адаптивности сборочного робота [4, 5].

Yun S.K. [4] предложил использовать алгоритм градиентного спуска для пассивных податливых шарниров. Каждый податливый шарнир в манипуляторе был оснащен последовательным упругим приводом, чтобы он мог пассивно адаптироваться к окружающей среде. Ошибки позиционирования и силы оценивались с помощью функции стоимости в алгоритме градиентного спуска. Park и др. [2] усовершенствовали устройство соответствия, заменив оборудование для соответствия с удаленным центром (УЦ) на программируемое оборудование для соответствия, в котором пружины и демпферы могут быть запрограммированы. Такое усовершенствование позволило решить некоторые проблемы двуплечих узлов ВВ, связанные с ограниченным разрешением или точностью обнаружения помех или разрывов в неструктурированной среде.

В работе [6], представлены результаты анализа процесса сборки, включающего в себя применение физико-технических эффектов с целью обеспечения технологической надежности сборочных операций. Расширение технологических возможностей роботизированной сборки представляется возможным благодаря совместному применению низкочастотной вибрации и вращательного движения. Присутствие вибрации способствует исключению вероятности заклинивания в случае наличия перекоса деталей. Экспериментально доказано, что применение эффекта вращения и низкочастотных колебаний существенно расширяет технологические зоны сборки без заклиниваний. Полученные результаты позволяют утверждать, что при использовании рациональных технологических режимов процесса на основе эффекта вращения и низкочастотных колебаний, полностью исключается вероятность заклинивания и значительно снижаются сборочные силы.

Quek Z.F. и др. [3] разработали тактильное устройство с шестью степенями

свободы (DOF). Оно имитировало деформацию человеческого пальца с помощью режимов деформации кожи на подушечках пальцев. Сила и крутящий момент устройства передавались посредством перемещения и вращения кожи. Результаты показали, что участники могут использовать тактильные датчики для уменьшения силы и момента взаимодействия. Примечательно, что участники использовали тактильные сигналы силы для снижения силы взаимодействия больше, чем тактильные сигналы крутящего момента для снижения крутящего момента взаимодействия. Основная причина такого результата заключается в том, что информация о моменте деформации кожи может быть менее интуитивной, чем информация о силе деформации кожи [3].

Имитировать человеческое прикосновение сложно. Кроме того, выбор параметров управления, даже если прикосновение может быть имитировано устройством, представляет собой сложную задачу. Поэтому значение и точность параметров управления будут в значительной степени зависеть от датчиков и устройств. Ранее также была разработана антропоморфная рука робота без дополнительных датчиков и устройств [7]. Для сборки ВВ в эксперименте был предложен робот-сборщик с тремя пальцами, а также «интуитивная стратегия вал со втулкой». Fukukawa T. и др. [5] стремились повысить точность сборки деталей кольцевого типа и разработали манипулятор с тремя параллельными пальцами, чтобы максимизировать замкнутый объем рабочего пространства. Используя предложенную стратегию управления, роботы могли выполнять точную сборку деталей кольцевого типа в режиме управления с открытым контуром. Геометрия и механические условия сборки кольца были оптимизированы для получения поллой формы. В табл. 1 представлены существующие работы с пассивными податливыми механизмами, известными к настоящему времени.

1. Методы сборки на основе пассивных податливых механизмов

1. Assembly methods based on passive compliant mechanisms

Издание, год	Характеристики	Схематическая диаграмма	Схема процесса сборки
Park и др. [2], 2014	– виртуальное программирование пружин; – оптимизирует оригинальное оборудование УЦ; – возможность решения задачи сборки ВВ в крошечной среде.		
Quek и др. [3], 2015	– тактильное устройство с шестью степенями свободы; – устройство может имитировать деформацию человеческого пальца; – применение сигналов деформации кожи.		
Fukukawa и др. [5], 2016	– максимизирует замкнутую область в интерференционный граф; – параллельный манипулятор в форме трех пальцев; – стратегия сборки кольца; – без обратной связи с датчиком.		
Yun [4], 2008	– метод градиентного спуска; -пассивный манипулятор (серия упругих приводов); – функция отражает ошибку положения и силы; – быстрые и стабильные условия обучения.		
Чан Чунг Та [6], 2022	– метод роботизированной сборки цилиндрических соединений с зазором при наличии вращательного движения и низкочастотных колебаний; – математическая модель динамики движения центра масс вала по отношению к неинерциальной системе координат, жестко связанной со втулкой; – результаты компьютерного моделирования процесса роботизированной сборки		
Park и др. [7], 2015	– интуитивная стратегия «вал в отверстии»; – антропоморфный робот; – антропоморфный процесс сборки		

Метод активной адаптации

Метод активной адаптации измеряет контактную силу или момент и передает их значения контроллеру для формирования траектории движения выходного звена робота [8]. Активное управление помогает преодолеть недостатки пассивного управления и имеет очень широкие перспективы применения. По особенностям реализации активные стратегии управления можно разделить на две категории: стратегии управления импедансом и гибридные стратегии управления силой/положением.

Управление импедансом

Для успешного выполнения сборки ВВ применяется импедансное управление настраиваемыми параметрами, относящимися к

положениям, скоростям и их динамическим связям в режиме реального времени.

Совместная задача человека и робота включает в себя задачу переноса и задачу корректировки. Управление с переменным импедансом и компенсационное управление, основанные на позиционном управлении и управлении моментом, соответственно, для собственного веса и трения робота, представлены в работе Mol N. и др. [8]. Авторы разработали стратегию управления со вложенным импедансом и датчиком силы, чтобы смягчить некоторые недостатки чисто импедансного управления. Архитектура импедансного управления с датчиком силы показана на рис. 2. Результаты показали, что максимально допустимый угол смещения был в 13 раз выше, а ограничения и крутящий момент – в пять раз ниже, чем у чисто импедансного управления.

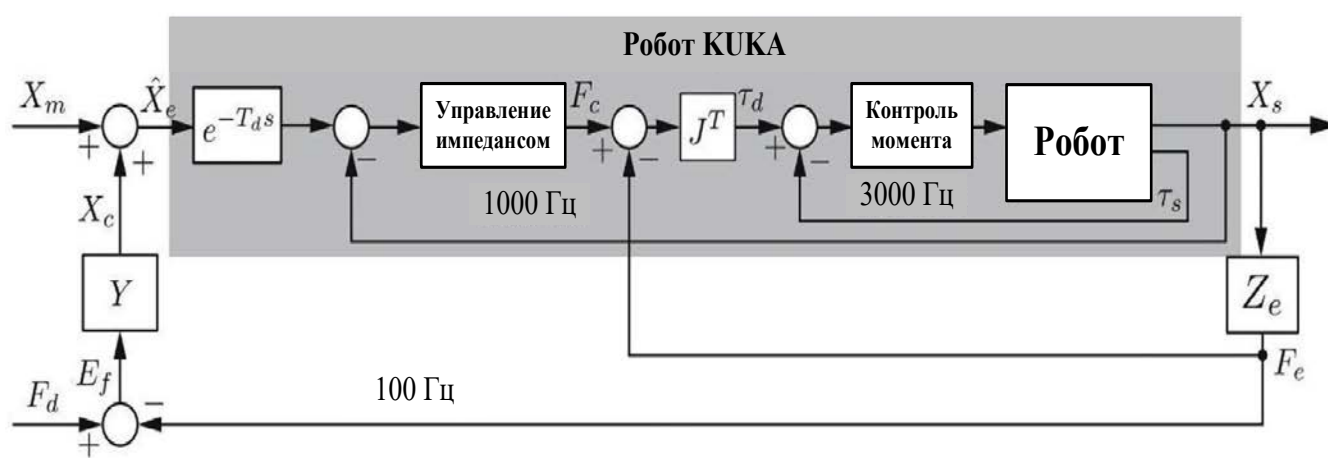


Рис. 2. Архитектура управления импедансом с внешним контуром управления допуском с задержкой [8]:

Z_e – окружающая среда; τ_d – требуемый крутящий момент; τ_s – измеренный крутящий момент во внутреннем контуре управления крутящим моментом ведомого робота; X_s – выходное положение робота

Fig. 2. Impedance control architecture with an external control circuit with a delay tolerance [8]:

Z_e – the environment; τ_d – the required torque; τ_s – a measured torque in the internal torque control circuit of the slave robot; X_s – robot advantageous position

Импедансное управление является эффективным методом управления силой робота и широко изучается благодаря низкой вычислительной сложности и высокой надежности [9 – 12]. Его можно

комбинировать с алгоритмами и устройствами для сборки деталей сложной формы. Song H.C. и др. [9] использовали модель сложной детали, созданную с помощью автоматизированного проектирования (CAD), для

управления силой и положением робота. Аналогично, для работы с гибкими резиновыми объектами Jasim и др. [10] предложили интегрированный метод, названный стратегией робастного адаптивного управления без модели (MFRAC), основанный на адаптивной нечеткой системе управления в скользящем режиме и общих функциях Ляпунова. Эксперименты показали, что стратегия MFRAC была эффективна для сборки гибких прищепок даже при неопределенности параметров модели и импеданса. Korpela С. и др. [11] исследовали возможность выполнения сборки ВВ для деталей самолета. Они разработали кинематические и динамические модели роботов, реализующие управление импедансом. Cho и др. [12] разработали наблюдатель возмущений для измерения и оценки возмущений крутящего момента в суставе, подверженном воздействию внешних сил.

Гибридное управление силой/положением

К настоящему времени гибридное управление силой и положением продемонстрировало большой потенциал для управления усилием робота. Очевидной особенностью является то, что сила и положение учитываются одновременно. Потенциал гибридного управления силой и положением был доказан теоретически, однако его практическое применение все еще сталкивается с некоторыми трудностями. Для улучшения результатов управления исследователи приложили большие усилия, чтобы объединить генетические алгоритмы, адаптивные алгоритмы и нечеткие системы управления с гибридными системами управления силой и положением [13, 14].

Wang и др. [14] предложили гибридную стратегию управления силой и

положением для замены соответствующих систем управления силой и положением. При их реализации нечеткий контроллер совместного импеданса со скользящим режимом (FSMJIC) был применен для объединения обратной связи по зрению и силе, чтобы улучшить управление роботом. Lee D.H. и др. [13] провели исследование, посвященное реализации роботизированной сборки ВВ, имитирующей действия человека, а именно с использованием двойных манипуляторов и роботизированных рук. Стратегия сборки вала со втулкой в данном исследовании состоит в основном из двух частей: стратегии захвата и стратегии сборки. Для фактической реализации предложена схема управления силой с обратной связью. Также рассматривается гибридное управление силой и положением для реализации стратегии сборки. Разработка гибридного контроллера силы/положения – непростая задача, поскольку управление силой должно быть интегрировано с алгоритмом поиска отверстия. Bdiwi и др. [15] исследовали решение, в котором зарядный штекер был задействован в нескольких зарядных интерфейсах.

Для сборки на микроуровне Jain R.K. [16] разработал систему микроманипулирования с использованием гибридного управления силой/положением композита «ионный полимер-металл» (IPMC), в котором сборка на микроуровне характеризовалась большим смещением, неопределенной величиной силы и необходимостью компенсации смещения. Все эти аспекты были решены в предложенной системе. На рис. 3 показана схема системы микроманипулирования для сборки ВВ. Кроме того, в табл. 2 приведен обзор известных работ по активному управлению податливостью на основе временной последовательности

2. Методы сборки на основе активной адаптации

2. Assembly methods based on active adaptation

Тип управления	Издание, год	Стратегия и подход	Основной вклад
Управление импедансом	Mol и др. [8], 2016	– стратегия управления вложенным адмиттансом/импедансом	– вложенный регулятор адмиттанса-импеданса; – активно оценивает и минимизирует влияние геометрического смещения; – возможность регулировки вращательного смещения (максимально допустимое смещение 20°); – стратегия управления вложенным адмиттансом/импедансом на основе датчика силы в замкнутом контуре; – повышение надежности и производительности задачи ВВ.
	Song и др. [9], 2014	– управление силой на основе визуально получаемой геометрической информации и CAD-моделей модели	– геометрически сложная стратегия сборки ВВ; – компенсирует ошибки положения и ориентации в сложных ВВ.
	Cho и др. [12], 2014	– наблюдатель возмущений; – преобразование матрицы Якоби в силу и момент в декартовом пространстве; – импедансный регулятор, спроектированный в декартовом пространстве.	– уменьшение трения при чувствительности роботов; – алгоритм управления силой без датчиков для промышленных роботов; – наблюдатели измеряют и оценивают возмущающий момент.
	Korpela и др. [11], 2013	– моделирование кинематики и динамики; – обратная связь по усилию; – контроль импеданса; – открытая виртуальная среда для робототехники.	– изучение сборки самолетов; – генерируемые кинематические решения и траектории движения робота; – анализ различий между ВВ и другими ассамблеями.
	Jasim и др. [10], 2015	– робастное адаптивное управление без модели (MFRAC)	– гибкая стратегия сборки; – может применяться для динамического управления произвольным импедансом.
Гибридное управление силой/положением	Wang [14], 2016	– гибридное управление силой и положением с помощью визуальной информации; – нечеткое управление импедансом сустава в скользящем режиме.	– визуальная информация повышает способность к соблюдению; – интегрированная визуальная и силовая информация; – эффективное снижение влияния экологических ограничений; – решена проблема вибрации контроллера привода.
	Bdiwi и др. [15], 2015	– стратегия позиционирования на основе визуальной и инфракрасной информации; – силовое управление в сочетании со спиральным алгоритмом.	– сокращение ошибок при сборке, вызванных визуальными датчиками; – выполнена сборка 5-контактного промышленного штекера зарядного устройства.
	Farrugia [13], 2015	– транспьютерная сеть (производительность параллельной обработки данных на шести компьютерах).	– построение общего датчика силы; – предложен общий контроллер для гибкой сборки.
	Jain [16], 2013	– микроманипулятор из ионного полимерного металлокомпозита (IPMC).	– разработан мультимикрооперационная система; – стратегия сборки Micro ВВ.
	Нгуен Ван Зунг [17], 2023	– идентификатор контактных состояний на различных этапах процесса сопряжения; – создание алгоритма управления промышленным роботом при роботизированной сборке на основе силомоментного оучувствления.	– разработка математических моделей контактных состояний при роботизированной сборке цилиндрических соединений; – применение позиционно-силового управления позволяет идентифицировать положение вала и втулки.

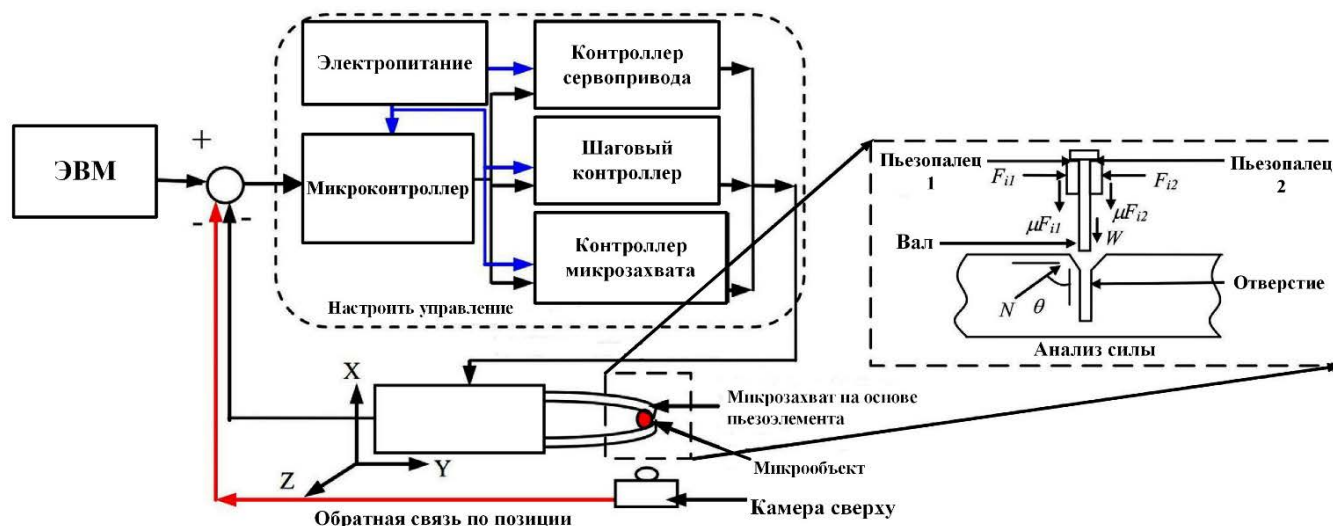


Рис. 3. Схема управления микроманипулятором [16]

Fig. 3. Micromanipulator control scheme [16]

В работе [17] был исследован метод активной адаптации на основе управления с обратной связью, использующий силомоментный датчик. Было определено положение точки контакта жесткого вала и втулки при сопряжении с помощью сигналов силомоментного датчика. Полученная информация о положении точки контакта позволяет вносить корректировки в движение рабочего органа робота во время выполнения операции сборки. Разработанный метод сборки, основанный на активной адаптации и использовании силомоментного датчика, обеспечивает высокую технологическую надежность процессов сопряжения цилиндрических соединений с малым зазором.

В рамках формирования навыков робота для распознавания контактных ситуаций в окружающей среде, основанных на сигналах силомоментного датчика, распознавание контактных состояний представляется одним из важнейших элементов реализации концепции программирования при активной адаптации робота. В работе [18] предложен метод машинного обучения для распознавания состояний контакта нежесткой цилиндрической детали, сопрягаемой с жесткой втулкой при роботизированной сборке на основе метода машины опорных векторов. Построена модель определения состояния контакта на основе данных о усилиях с силомоментного датчика и координатах положения из

системы промышленного робота. Результаты исследования являются основой для разработки алгоритма позиционно-силового управления при роботизированной сборке нежестких деталей.

Методы управления с использованием вспомогательных операций

Для повышения гибкости робота, позволяющей ему справляться со сложными операциями сборки, в него могут быть интегрированы вспомогательные технологии. Однако классические стратегии управления по-прежнему играют важную роль в процессе выполнения задач сборки роботами [20]. Существующие методы управления были усовершенствованы с помощью вспомогательных устройств, что еще больше расширяет область применения вышеупомянутых методов управления. В данной работе под вспомогательной технологией понимаются стратегии и методы управления, используемые при сборке ВВ путем внедрения вспомогательных устройств.

Для повышения гибкости сборочных роботов было разработано множество вспомогательных устройств. Например, система Леар-движение была использована для восприятия поз человеческих рук, чтобы робот мог имитировать движения рук [19]. Новый наблюдатель без датчиков был предложен в качестве вспомогательного устройства для помощи

роботу в выполнении процессов сборки [20]. Takahashi J. и др. [21]. предложили метод управления для сборки деталей типа колец. Для решения проблемы деформации во время сборки деталей была предложена новая техника сопряжения, основанная на принципе пассивного выравнивания (РАР). РАР позволяет корректировать положение кольца и минимизировать его деформацию до наноразмеров. Упругость деталей типа «кольцо» также была проанализирована Alrizar и др. [19]. Они предложили новую стратегию работы с деформируемым объектом, когда он вставляется двуручным роботом. Для определения траектории движения робота на основе улавливаемого движения человеческой руки использовался контроллер шагового движения (рис. 4, а).

Поведение пьезоэлектрического микрозахвата и микрооперационной системы анализируется путем использования визуальных датчиков. Эти датчики способны обеспечить высокую точность позиционирования цели во время выполнения микрозахватов роботом, что позволяет ему точно находиться и перемещаться между различными положениями отверстий в рабочем пространстве. Однако пьезоэлектрический привод имеет нелинейные характеристики, являющиеся единственным ограничением данной технологии [22]. Рис. 4, б представляет собой САПР-модель микрооперационной системы, основанной на пьезоэлектрических приводах, и схему управления каждым микроманипулятором.

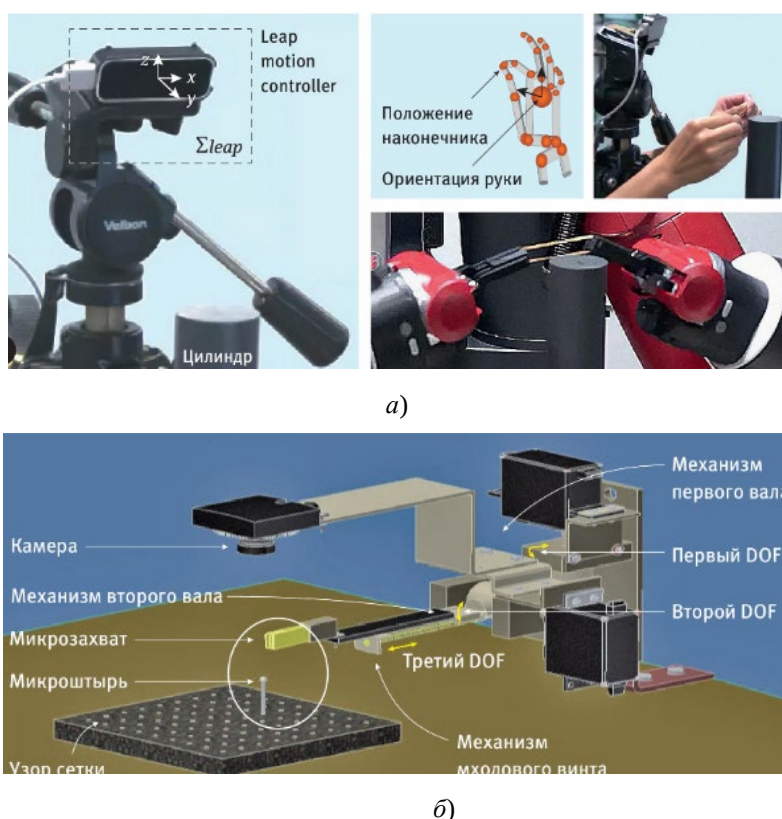


Рис. 4. Стратегия контроля сборки с использованием вспомогательной технологии:

а – стратегия поиска гибкой сборки на основе «контроллер шагового движения» [18]; б – стратегия поиска микро-нано на основе двухчипового пьезоэлектрического драйвера и микрооперационной системы [22]

Fig. 4. Assembly control strategy using auxiliary technology:

а – flexible assembly search strategy based on the «step motion controller» [18]; б – micro-nano search strategy based on a two-chip piezo-electric driver and a micro-operation system [22]

Savarimuthu и др. [23] использовали дистанционный подход для проведения экспериментов по сборке ВВ с различными

начальными конфигурациями для получения точных данных в среде сборки. Согласно анализу данных захвата, генерируемых

операторами, была предложена стратегия сборки с целью получения стратегии выполнения действий операторов роботом. В работе

использована роботизированная рука с шестью степенями свободы и гибкий трехпальцевый схват SDH-2 (рис. 5).

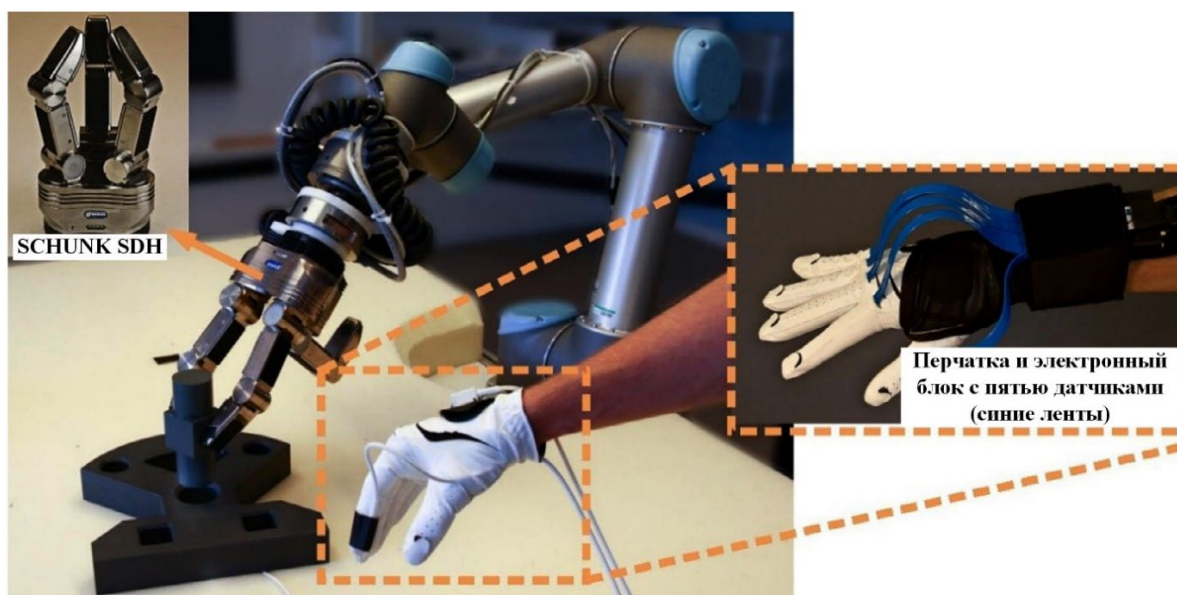


Рис. 5. Телеоперационная установка с датчиком, закрепленным на руке и манипулятором Universal робот [23]

Fig. 5. Teleoperation installation with a sensor mounted on the arm and The Universal robot manipulator [23]

Заключение

По сравнению с ручной сборкой, роботизированная имеет целый ряд преимуществ, а стратегии управления показали свой потенциал в замене человека-оператора для полной автоматизации процессов сборки. В представленной работе классифицированы и обобщены последние исследования, основные методологии и ограничения.

Соответствующие стратегии управления делятся на активные и пассивные. Пассивные механизмы подчинения менее эффективны, но в нескольких недавних исследованиях были сделаны некоторые улучшения для повышения адаптивности роботизированной сборки. Улучшения в основном касались интеграции тактильных характеристик человеческих рук и оптимизации конструкции роботов для повышения эффективности процессов сборки. Активные податливые механизмы могут быть использованы для преодоления недостатков пассивных податливых

механизмов, и исследования активных податливых механизмов привлекают большое внимание. Ожидается, что активные стратегии управления позволят решить большинство проблем, возникающих при сборке роботами. Хотя не все активные податливые механизмы достигли ожидаемых результатов, необходимы дальнейшие усилия для улучшения адаптивности и надежности существующих податливых стратегий сборки.

Стратегии вспомогательной сборки используют вспомогательные устройства, программное обеспечение и алгоритмы для облегчения процессов сборки. Вспомогательные устройства сложны и дороги, а циклы их разработки отнимают много времени. Были предприняты усилия по использованию некоторых распространенных устройств, таких как Leap- движение и системы визуализации. Для роботизированной сборки отсутствует доступное вспомогательное сборочное оборудование.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Xu L.D.** et al. AutoAssem: an automated assembly planning system for complex products // Proceedings of the IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2012. V. 8. Iss. 3. P. 669–678, DOI: doi.org/10.1109/TII.2012.2188901.
2. **Park H.** et al. Dual arm peg in-hole assembly with a programmed compliant system // Proceedings of the Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). 2014. P. 431–433. DOI: doi.org/10.1109/URAI.2014.7057477.
3. **Quek Z.F.** et al. Sensory substitution of force and torque using 6-DOF tangential and normal skin deformation feedback // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE. 2015. P. 264–271. DOI: doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139010.
4. **Yun S.K.** Compliant manipulation for peg-in-hole: is passive compliance a key to learn contact motion? // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE. 2008. P. 1647–1652. DOI: doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543437.
5. **Fukukawa T., Park J., Fukuda T.** Precise assembly of ring part with optimized hollowed finger // ROBOMECH Journal. 2016. V. 16. P. 13–15. DOI: doi.org/10.1186/s40648-016-0055-1.
6. **Tran, C.T.** Increasing the technological reliability of automatic assembly of cylindrical joints based on rotational motion and low-frequency vibrations: dis. ...cand. those. Sciences: 02/05/08 / Tran Chung Ta. Moscow, 2021. 155 p.
7. **Park H.** et al. Robotic peg-in hole assembly by hand arm coordination // The Journal of Korea Robotics Society. 2015. V. 10. P. 42–51. DOI: doi.org/10.7746/jkros.2015.10.1.042
8. **Mol N.** et al. Nested compliant admittance control for robotic mechanical assembly of misaligned and tightly toleranced parts // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), IEEE. 2017. P. 2717–2722. DOI: //doi.org/10.1109/SMC.2016.7844650.
9. **Song H.C., Kim Y.L., Song J.B.** Automated guidance of peg-in-hole assembly tasks for complex-shaped parts // Proceedings of the IEEE/RSInternational Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2014. P. 4517–4522. DOI: //doi.org/10.1109/IROS.2014.6943202.
10. **Jasim I.F., Plapper P.W., Voos H.** Model-free robust adaptive control for flexible rubber objects manipulation // Proceedings of the Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE. 2015. P. 1–8. DOI: doi.org/10.1109/ETFA.2015.7301500.
11. **Korpela C.** et al. Towards the realization of mobile manipulating unmanned aerial vehicles (MM-UAV): peg-in-hole insertion tasks // Proceedings of the IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, IEEE. 2013. P. 1–6. DOI: //doi.org/10.1109/TePRA.2013.6556353.
12. **Cho H.** et al. Cartesian sensor less force control for industrial robots // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE. 2014. P. 4497–4502. DOI: //doi.org/10.1109/IROS.2014.6943199
13. **Lee D.H.** et al. Peg-in-hole assembly with dual-arm robot and dexterous robot hands // Proceedings of the IEEE Robotics and Automation Letters, IEEE. 2022. V. 7. Iss. 4. P. 8566–8573. DOI: //doi.org/10.1109/LRA.2022.3187497.
14. **Wang K.J.** Fuzzy sliding mode joint impedance control for a tendon-driven robot hand performing peg-in-hole assembly // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE. 2017. P. 2087–2092. DOI: //doi.org/10.1109/ROBIO.2016.7866637.
15. **Bdiwi M., Winkler A., Such J.** Improved peg-in hole (5-pin plug) task: intended for charging electric vehicles by robot system automatically // Proceedings of the International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, IEEE. 2015. P. 1–5. DOI: //doi.org/10.1109/SSD.2015.7348200.
16. **Jain R.K., Saha S., Majumder S.** Development of piezoelectric actuator based compliant micro gripper for robotic peg-in-hole assembly // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, IEEE. 2013. P. 1562–1567. DOI: //doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739689.
17. **Nguyen Van Dung.** Increasing the technological reliability of a robotic assembly based on the development of a robot control algorithm // Izvestia of Tula State University, 2022, no. 4, pp. 518–528. DOI:10.24412/2071-6168-2022-4-518-528.
18. **Vartanov M.V., Nguyen Van Linh.** Recognition of contact states of non-rigid cylindrical parts during robotic assembly based on the support vector machine // Assembly in mechanical engineering, instrument making, 2024, no. 1, pp. 3–10. DOI: //doi.org/10.36652/0202-3350-2024-25-1-3-10.
19. **Ramirez-Alpizar I.G., Harada K., Yoshida E.** Human-based framework for the assembly of elastic objects by a dual-arm robot // ROBOMECH Journal 4. 2017. V. 20. P. 902. DOI: // doi.org/10.1186/s40648-017-0088-0.
20. **Cho H.** et al. Cartesian sensor-less force control for industrial robots // Proceedings of the IEEE/RSJ

International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE. 2014. P. 4497–4502. DOI: //doi.org/10.1109/IROS.2014.6943199.

21. **Takahashi J., Fukukawa T., Fukuda T.** Passive alignment principle for robotic assembly between a ring and a shaft with extremely narrow clearance // IEEE/ASME Trans. Mechatron. 2016. V. 21. Iss. 1. P. 196–204. DOI: //doi.org/10.1109/TMECH.2015.2448639.

22. **Jain R.K., Saha S., Majumder S.** Development of piezoelectric actuator based compliant micro gripper

for robotic peg-in-hole assembly // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Shenzhen. 2013. P. 1562–1567. DOI: //doi.org/10.1109/ROBIO.2013.6739689.

23. **Savarimuthu T.R., Liljekrans D., Ellekilde L.P.** Analysis of human peg-in hole executions in a robotic embodiment using uncertain grasps // Proceedings of the 9th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo), IEEE. 2013. P. 233–239. DOI: //doi.org/10.1109/RoMoCo.2013.6614614.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 27.02.2024.

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; assepted for publication 27.02.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.06.2024. Выход в свет 28.06.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет» 241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+