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

№ 2(14)
2019

Выходит 4 раза год

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

*В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в
машиностроении 2019» (9 – 13 сентября 2019 года)*

Севастополь 2019

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Главный редактор

д.т.н., проф. БРАТАН С.М.

Зам. главного редактора

к.т.н., проф. – ХАРЧЕНКО А.О.

Научный редактор

д.т.н., проф. ПОКИНТЕЛИЦА Н.И.

Отв. секретарь

к.т.н., доц. ЛЕВЧЕНКО Е.А.

Редакционная коллегия

АБДУЛГАЗИС У.А.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ГЛЕЗЕР А. М.	д. ф-м. н, проф. (г. Москва)
БОХОНСКИЙ А.И.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
БУРНАШЕВ М.А.	д. т. н., доц. (г. Орел)
ДУЮН Т.А.	д. т. н., доц. (г. Белгород)
КОЗЛОВ А.М.	д. т. н., проф. (г. Липецк)
КОПП В.Я.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
МАЛЫШЕВА Г.В.	д. т. н., проф. (г. Москва)
МИХАЙЛОВ А.Н.	д. т. н., проф., (г. Донецк, Украина)
НОСЕНКО В.А.	д. т. н., проф. (г. Волжский)
ОБЖЕРИН Ю.Е.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
НОВОСЕЛОВ Ю.К.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
ПАШКОВ Е.В.,	д. т. н., проф. (г. Севастополь)
СУСЛОВ А.Г.	д. т. н., проф. (г. Москва)
ФЕДОНИН О.Н.	д. т. н., проф. (г. Брянск)
ЯКУБОВ Ф.Я.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
ЯРОШЕНКО А.А.	д. т. н., проф. (г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

Залазинский А.Г., Швейкин В.П., Титов В.Г. Экспертная система для совершенствования технологических процессов изготовления композитов.....	4
Плесовских А.Ю., Крылова С.Е., Оплеснин С.П. Импортозамещающая технология изготовления деталей нефтегазодобывающей отрасли с нанесением износостойких покрытий на основе вольфрама.....	9
Пашков Е.В., Поливцев В.П., Калинин М.И., Поливцев В.В. Комбинированный мультисильфонный гидровытеснитель.....	15
Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А. Синтез подсистемы наблюдений для операции шлифования	21
Новиков П.А. Историческая ретроспектива и новые технологии формирования внутренних резьб	29
Тараховский А.Ю., Тараховский А.А. Анализ основных видов уплотнений для силовых гидроцилиндров	37
Левченко Е.А. Исследование зависимости динамических и технологических параметров процесса обработки деталей с вибрациями	44
Секлетина Л.С., Янюшкин А.Р., Мулюхин Н.В. Шлифование твердого сплава и минералокерамики комбинированным электроалмазным методом	49
Бохонский А.И., Рыжков А.И. Пример конструирования управляемого движения упругого объекта	55
Водолазский Ф.В., Горностаева Е.А., Илларионов А.Г. Структура и свойства горячепрессованной трубы из титанового сплава ПТ7М.....	59

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

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.

COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS

Chief Editor

D.Sc., Prof. – BRATAN S.M.

Associate Editor in Chief

Ph.D., Prof. – KHARCHENKO A.O.

Scientific Editor

D.Sc., Prof. – POKINTELITSA N.I.

Executive Secretary

Ph.D., Associate Prof. – LEVCHENKO E.A.

Editorial team

ABDULGAZIS U.A.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
GLEZER A.M.	D.Sc., Prof. (Moscow)
BOHONSKIY A.I.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
BURNASHEV M.A.	D.Sc., Associate Prof. (Orel)
DUYUN T.A.	D.Sc., Associate Prof. (Belgorod)
KOZLOV A.M.	D.Sc., Prof. (Lipetsk)
KOPP V.YA.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
MALYSHEVA G.V.	D.Sc., Prof. (Moscow)
MIKHAILOV A.N.	D.Sc., Prof. (Donetsk)
NOSENKO V.A.	D.Sc., Prof. (Volzhsky)
OBEZHERIN YU.E.	D.Sc.Prof. (Sevastopol)
NOVOSELOV YU.K.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
PASHKOV E.V.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)
SUSLOV A.G.	D.Sc., Prof. (Moscow)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

CONTENTS

Zalazinsky A.G., Shveykin V.P., Titov V.G. The expert system for improvement of technological processes of manufacturing composites.....	4
Plesovskikh A.Y.; Krylova S.E., Oplesnin S.P. Import-substituting technology for manufacturing parts of the oil and gas industry with the application of wear-resistant coatings based on tungsten.....	9
Pashkov E.V., Polivtsev V.P., Kalinin M.I., Polivtsev V.V. Combined multicellphone gidrotechnical.....	15
S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, E.A. Vladetskaya Synthesis of the subsystem of supervision for grinding operation.....	21
Novikov P.A. Historical retrospective and new technologies for forming inner threads	29
Tarakhovskiy A.Yu., Tarakhovskiy A.A. Analysis of the main types of seals for power cylinders	37
Levchenko E.A. Investigation of the dependence of the dynamic and technological parameters of the processing of parts with vibrations.....	44
Sekretina L.S., Yanyushkin A.R., Muliukhin N.V. Grinding of hard alloy and mineral ceramics using combined electro-diamond method.....	49
Bokhonsky A.I., Ryzhkov A.I. Example of controlled motion designing for an elastic object.....	55
Vodolazskiy F.V., Gornostaeva E.A., Illarionov A.G. Structure and properties of hot-extruded tube of titanium alloy	59

Founder and publisher: FSAEO HE «Sevastopol State University, St. Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russian Federation; FSBEU HE «Bryansk State Technical University», Boulevard 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk, 241035, Russian Federation

The collection is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass communications. The certificate PI № FS 77 - 64121 of 25.12.2015

УДК 621.7:004.891

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ

А.Г. Залазинский¹, В.П. Швейкин^{1,2}, В.Г. Титов¹¹ ФГБУН «Институт машиноведения УрО РАН», г. Екатеринбург, Российская Федерация² ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация

Представлена экспертная система для совершенствования технологических процессов изготовления композитов. Предметной областью экспертной системы является технология обработки давлением структурно-неоднородных материалов, в том числе порошковых материалов и композитов. Назначением экспертной системы является интерпретация экспериментальных данных и прогнозирование физико-механических свойств заготовок и изделий. Цель функционирования экспертной системы - выдача рекомендаций по совершенствованию технологических процессов изготовления заготовок из некомпактного металлического сырья, вырабатываемых на основании предсказания свойств и поведения объекта исследования. Задачи, решаемые экспертной системой: планирование натурных и вычислительных экспериментов, статистическая обработка экспериментальных данных, регрессионный анализ, проверка адекватности математических моделей, многопараметрическая оптимизация исследуемых систем и процессов.

Ключевые слова: экспертная система, технологический процесс, композит, обработка давлением, регрессионный анализ, многопараметрическая оптимизация.

THE EXPERT SYSTEM FOR IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MANUFACTURING COMPOSITES

A.G. Zalazinsky¹, V.P. Shveykin^{1,2}, V.G. Titov¹¹Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, the Russian Federation²The Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, the Russian Federation

Abstract

The expert system for improvement of technological processes of manufacturing composites is presented. The subject area of the expert system is the technology of pressure treatment of structurally inhomogeneous materials, including powder materials and composites. The assignment of the expert system is the interpretation of experimental data and prediction of physical and mechanical properties of blanks and products. The purpose of the operation of the expert system is to provide recommendations for improving the technological processes of manufacturing blanks from non-compact metal raw materials produced on the basis of prediction of the properties and behavior of the object of study. Problems solved by the expert system: planning of field and computational experiments, statistical processing of experimental data, regression analysis, checking the adequacy of mathematical models, multiparameter optimization of the studied systems and processes.

Keywords: expert system, technological process, composite, pressure treatment, regression analysis, multiparameter optimization.

Созданию интегрированной системы контроля и управления качеством продукции предшествует системный анализ технологических процессов. При этом в качестве основного инструмента управления качеством является статистический контроль качества. Статистическое направление контроля и управления качеством продукции получило широкое распространение. Вме-

сте с тем, его роль в общей системе управления качеством нередко абсолютизируется. Часто в единых рамках формулируются независимые и противоречивые функции качества в ущерб исследуемой технологической системе в целом. В связи с этим возникла относительно новая концепция проектирования и реализации систем обеспечения качества (концепцией общего управле-

ния качеством), основанная на надёжных математических моделях с использованием статистических данных. В соответствии с названной концепцией для действующего производства композитов и изделий из них предпринята разработка ряда автоматизированных систем: АСНИ, АСТПП, АСУТП. Реализация и повышение эффективности автоматизированных систем обеспечивается интеграцией их на основе согласования информационного, технического, программного и организационного обеспечения. Управление качеством продукции заключается в выработке и последующей реализации управляющих воздействий по достижению требуемого уровня показателей качества на всех стадиях жизненного цикла промышленной продукции. В этой статье представлены первые результаты работы по созданию автоматизированной системы контроля и управления качеством продукции (АСК и УКП) в процессах пластического деформирования структурно-неоднородных материалов, к которым относятся процессы деформирования порошковых материалов и композитов. Основные принципы разработки такой системы приведены в работе [1].

Принципиальная схема системы контроля и управления качеством продукции показана на рис. 1. Схема отражает передачу информации о технологических режимах к окнам контроля качества K_n^i , а также к моделирующему центру МЦ, где с использованием технических средств и соответствующего программного обеспечения вырабатываются рекомендации для поддержки и совершенствования технологической системы. АСК и УКП оснащается экспертной системой, которой снабжены окна контроля качества продукции и комплексом программ для многокритериальной оптимизации технологических процессов и систем.

Функции окна контроля качества продукции показаны на рис. 2. Оценка и диагностика состояния технологических процессов производится в автоматическом режиме с использованием результатов математического моделирования. При этом инженер-технолог, отвечающий за состояние

производства, получает информацию от МЦ в режиме "совета", выполняя роль лица принимающего решения (ЛПР) [2, 3].

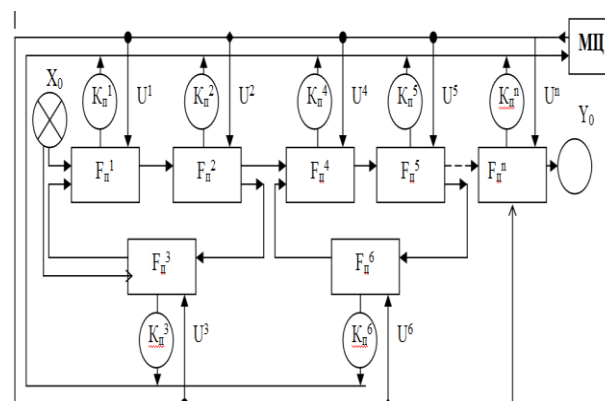


Рис. 1. Схема контроля и управления качеством продукции: МЦ - моделирующий центр; F_n^i - передаточные функции одноступенчатых моделей (технологических операций); K_n^i - окна контроля качества, $i=1, 2, \dots, n$

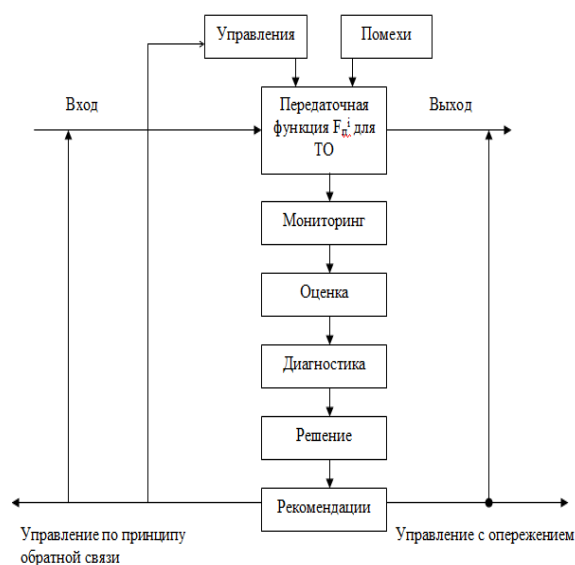


Рис. 2. Функции окна контроля качества продукции

АСК и УКП содержит окна контроля качества продукции (рис. 1), в состав которых входит экспертная система (ЭС). Предметной областью ЭС является технология обработки давлением структурно-неоднородных материалов, в том числе порошковых материалов и композитов [4, 5].

Назначением экспертной системы является интерпретация экспериментальных данных и прогнозирование физико-механических свойств заготовок и изделий. Цель функционирования экспертной систе-

мы - выдача рекомендаций по совершенствованию технологических процессов изготовления заготовок из некомпактного металлического сырья, вырабатываемых на основании предсказания свойств и поведения объекта исследования. Задачи, решаемые экспертной системой: планирование натурных и вычислительных экспериментов, статистическая обработка экспериментальных данных, регрессионный анализ, проверка адекватности математических моделей, многопараметрическая оптимизация исследуемых систем и процессов [6-15].

Функциональная схема ЭС показана на рис. 3.

База знаний (БЗ) предназначена для хранения долгосрочных данных, описывающих рассматриваемую предметную область, и правил, описывающих целесообразные преобразования данных этой области. В качестве предметной области выбирается узкая (специальная) прикладная область. Для создания ЭС в выбранной области собираются факты и правила, которые помещаются в БЗ вместе с механизмами вывода и упрощения.

В отличие от всех остальных компонент ЭС, база знаний изменяемая часть системы, которая может пополняться и модифицироваться инженерами знаний из опыта использования ЭС, между консультациями и в процессе консультации.

Существует несколько способов представления знаний в ЭС, однако общим для всех является то, что знания представлены в символьной форме (элементарными компонентами представления знаний являются тексты, списки и другие символьные структуры). Тем самым, в ЭС реализуется принцип символьной природы рассуждений, процесс рассуждения представляется в виде последовательности символьных преобразований. Существуют динамические и статические БЗ.

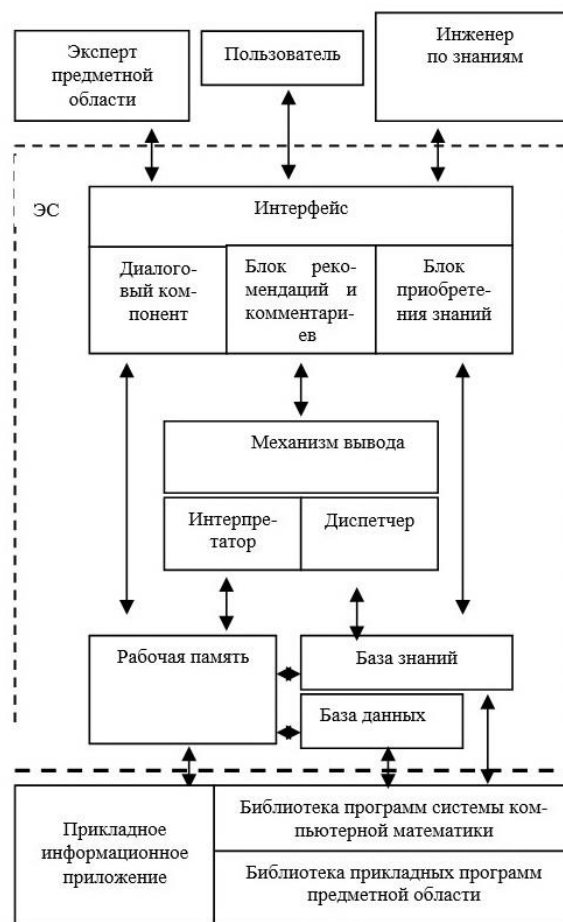


Рис. 3. Функциональная схема ЭС

В предлагаемой ЭС предусматривается динамическая БЗ, которая изменяется в режиме диалога с пользователем. Новые факты, добавляемые в базу знаний, являются результатом вывода, который состоит в применении правил к имеющимся фактам. В ЭС могут быть изменены даже те данные, которые после вывода уже вызвали срабатывание каких-либо правил. Иными словами, имеется возможность модифицировать значения атрибутов в составе фактов, находящихся в рабочей памяти. Изменение фактов приводит к необходимости удаления из базы знаний заключений, полученных с помощью упомянутых правил. Тем самым вывод выполняется повторно для того, чтобы пересмотреть те решения, которые были получены на основе подвергшихся изменению фактов.

База данных предназначена для хранения исходных и промежуточных данных решаемой в текущий момент задачи.

Механизм вывода использует информа-

цию из БЗ, генерирует рекомендации по решению искомой задачи. БЗ состоит из фактов и правил (если <посылка> то <заключение>). Если ЭС определяет, что посылка верна, то правило признается подходящим для данной ситуации и оно запускается в действие. Запуск правила означает принятие заключения данного правила в качестве составной части процесса. Цель ЭС - вывести некоторый заданный факт - целевое утверждение (то есть в результате применения правил добиться того, чтобы этот факт был включен в рабочее множество), либо опровергнуть этот факт (то есть убедиться, что его вывести невозможно, следовательно, при данном уровне знаний системы он является ложным). Целевое утверждение извлекается системой из диалога с пользователем. Работа системы представляет собой последовательность шагов, на каждом из которых из базы выбирается некоторое правило, которое применяется к текущему содержимому рабочего множества. Цикл заканчивается, когда выведено либо опровергнуто целевое утверждение. Цикл работы экспертной системы является логическим выводом В предлагаемой ЭС используется прямой вывод (вывод управляемыми данными) и обратный вывод.

Механизм вывода использует продукционную модель, которая основана на правилах и позволяет представить знания в виде предложений типа: если (условие), то (действие). В качестве условия и действия в правилах может быть, например, предположение о наличии того или иного свойства, принимающее значение истина или ложь. При этом термин действие трактуется широко: это может быть, как директива к выполнению какой-либо операции, рекомендация, или модификация базы знаний – предположение о наличии какого-либо производного свойства. Используется прямой вывод (от данных к цели) и обратный (от цели для ее подтверждения - к данным). Здесь под данными понимаем факты, на основании которых запускается механизм вывода - программа, перебирающая правила из базы.

Объяснительный компонент ЭС даёт

информацию, как система получила решение задачи (или почему она не получила решение) и какие знания она при этом использовала, что облегчает эксперту тестирование и повышает доверие пользователя к полученному результату.

Список литературы

1. Залазинский А.Г. Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов. Екатеринбург. УрО РАН. 2000. 492 с.
2. Салеев Д.В. Анализ методов многокритериальной оптимизации, применяемых при управлении технологическими процессами // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. 2013. № 2. URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2013/11/saleev_2_13_1.pdf
3. Лотов А.В., Поспелова И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие. М.: МАКС Пресс. 2008. 197 с.
4. Froes F.H., Smugersky J.E. Powder metallurgy of titanium alloys. The metallurgical society of AIME Publ., 1980. 263 p.
5. Hull D. and Clyne T.W. An Introduction to Composites Materials. Cambridge University Press, 1996. 326 p.
6. Odu G.O. Review of multi-criteria optimization methods – theory and applications / G.O. Odu, O.E. Charles-Owaba // IOSR Journal of Engineering. 2013. Vol. 3. Issue 10. P. 1–14.
7. Крючков Д.И. Выбор оптимального состава порошкового композиционного материала на основе титана для прессования заготовок / Д.И. Крючков, А.Г. Залазинский, А.П. Поляков, И.М. Березин, Т.Л. Щенникова, Г.Г. Залазинский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2014. №. 6. С. 34–38.
8. Крючков Д.И. Влияние состава механической смеси порошков титана на свойства заготовок / Д.И. Крючков, А.П. Поляков, А.Г. Залазинский, И.М. Березин, Ю.В. Субачев // Фундаментальные исследования. Технические науки. 2014. №. 9. С. 24–28.
9. Kryuchkov D.I. Modelling of compaction of titanium composite powders / D.I. Kryuchkov, A.G. Zalazinsky, I.M. Berezin, O.V. Romanova // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. №. 1. P. 48–60.
10. Hwang C.L. and Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 231 p.
11. Семенкин Е.С., Семенкина О.Э., Коробейников С.П. Оптимизация технических систем: учебное пособие. Красноярск: СИБУП, 1996. 285 с.
12. Horn J. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization / N. Nafpliotis, D.E.

Goldberg // *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Z. Michalewicz, Ed. Piscataway, NJ: IEEE Press. 1994. P. 82–87.

13. Микони С.В. Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив: учебное пособие. СПб.: Лань, 2009. 272 с.
14. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М.: Сов. Радио, 1975. 192 с.
15. Лотов А.В., Бушенков В.А., Каменев Г.К., Черных О.Л. Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей. М.: Наука, 1997. 240 с.

References

1. Zalazinsky A.G. Plastic deformation of structurally inhomogeneous materials. Yekaterinburg. UrO RAN. 2000. 492 p.
2. Saleev D.V. Analysis of multi-criteria optimization methods used in technological process control. *Modelirovanie, optimizacij i informacionnie tehnologii. Nauchnij jurnal*. 2013. № 2. URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2013/11/saleev_2_13_1.pdf.
3. Lotov A.V., Pospelova I.I. Multi-criteria decision-making tasks: Tutorial. Moscow: MAKS Press, 2008. 197 p.
4. Froes F.H., Smugersky J.E. Powder metallurgy of titanium alloys. The metallurgical society of AIME Publ., 1980. 263 p.
5. Hull D. and Clyne T.W. An Introduction to Composites Materials. Cambridge University Press, 1996. 326 p.
6. Odu G.O., Charles-Owaba O.E. Review of multi-criteria optimization methods – theory and applications. *IOSR Journal of Engineering*. 2013. Vol. 3. Issue 10. P. 1–14.
7. Kruchkov D.I., Zalazinsky A.G., Poljkov A.P., Berezin I.M., Shennikova T.L., Zalazinsky G.G. Selection of the optimal composition of powder composite material based on titanium for pressing blanks. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*. 2014. № 6. P. 34–38.
8. Kruchkov D.I., Poljkov A.P., Zalazinsky A.G., Berezin I.M., Subachev U.V. Influence of the composition of the mechanical mixture of titanium powders on the properties of blanks. *Fundamentalnye issledovaniy. Tehnicheskie nauki*. 2014. № 9. P. 24–28.
9. Kryuchkov D.I., Zalazinsky A.G., Berezin I.M., Romanova O.V. Modelling of compaction of titanium composite powders. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2015. № 1. P. 48–60.
10. Hwang C.L. and Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 231 p.

11. Semenkin E.S., Semenkina O.E., Korobeynikov S.P. Optimization of technical systems: tutorial. Krasnoyarsk: SIBUP, 1996. 285 p.
12. Horn J., Nafpliotis N., Goldberg D.E. A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Z. Michalewicz, Ed. Piscataway, NJ: IEEE Press. 1994. P. 82–87.
13. Mikoni S.V. Multicriteria choice on a finite set of alternatives: tutorial. Sankt-Peterburg: Lan, 2009. 272 p.
14. Podinovsky V.V., Gavrilov V.M. Optimization according to consistently applied criteria. Moscow: Sov. Radio, 1975. 192 p.
15. Lotov A.V., Bushenkov V.A., Kamenev G.K., Chernyh O.L. Computer and the search for a compromise. Method of achievable goals. Moscow: Nauka, 1997. 240 p.

УДК 669.056.9

ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ С НАНЕСЕНИЕМ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА

А.Ю.Плесовских¹, С.Е.Крылова², С.П. Оплеснин¹¹ООО «Технология» г. Оренбург, Российская Федерация²Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты реверс – инжиниринга включающего металлографические, механические и инженерно-технические исследования отработанных штоков компрессора зарубежного производства. Исследована структура поверхности и основы детали, определены механические характеристики и виды упрочнения резьбовой части штока и рабочей поверхности детали. Сделан вывод о возможности изготовления подобного изделия с использованием технологии газопламенного напыления металлургическими порошковыми композициями с содержанием вольфрама. Разработана промышленная технология нанесения износостойкого покрытия на рабочую поверхность штока из стали 45ХГМ. Представлены результаты исследования, выполненные на стандартных образцах и пилотной детали.

Ключевые слова: газопламенное напыление, шток компрессора, реверс-инжиниринг, износостойкие покрытия на основе вольфрама, дожимная компрессорная станция.

IMPORT-SUBSTITUTING TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING PARTS OF THE OIL AND GAS INDUSTRY WITH THE APPLICATION OF WEAR-RESISTANT COATINGS BASED ON TUNGSTEN

A.Y. Plesovskikh¹; S.E.Krylova², S.P.Oplesnin¹¹ООО «Technology», Orenburg, Russian Federation²Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

Abstract

The results of reverse engineering, including steel structures, mechanical and engineering-technical studies of foreign compressor compressor deposits, are presented. The structure of the surface and the base of the part is investigated, the mechanical characteristics and types of hardening of the parts of the thread surface and the surface of the part are determined. It was concluded that it is possible to manufacture such a product using the technology of gas-flame spraying with metallurgical powder compositions containing tungsten. An industrial technology has been developed for the application of wear-resistant coatings on working surfaces made of 45HGM steel. The results of studies performed on standard samples and pilot details are presented.

Keywords: flame spraying, compressor stock, reverse engineering, wear-resistant tungsten-based coatings, booster compressor station.

Ответственные детали, функционирующие на дожимных компрессорных станциях многих химических и нефтехимических предприятиях России, на данный момент выполнены из материалов и по технологиям зарубежных производителей. В условиях сложившихся внешнеэкономических отношений, приобретение и эксплуатация подобного рода изделий затруднительна. Учитывая потребность в импорто-

замещении подобного рода продукции, произведен реверс-инжиниринг штоков компрессоров Dresser-Rand Group (Siemens, Германия), CPI Compressor Products International (Великобритания) и CAMERON Compression Systems (США).

Основными потребителями данной продукции являются предприятия России и ближнего зарубежья: ООО Газпром добыча Оренбург, ОсОО Газпром Кыргызстан, ЗАО

Газпром нефть Оренбург, ОАО Салават-нефтехимремстрой, ПАО АНК Башнефть, ПАО Оренбургнефть, ОАО Казанькомпрессормаш.

Целью данного исследования является проведение реверс-инжиниринга отработанных штоков дожимной компрессорной станции с целью выявления основных особенностей получения и способов упрочнения детали. Для реализации данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- определение возможности и целесообразности изготовления детали, согласно результатам, проведенного оптического и микрорентгеноспектрального анализа, механических и технологических испытаний;
- разработка и внедрение оптимального технологического процесса нанесения упрочняющего покрытия с содержанием вольфрама, обеспечивающего требуемое сочетание эксплуатационных свойств.

Металлографические, механические и инженерно-технические исследования осуществляли на стандартных образцах, изготовленных из готовых изделий, бывших в эксплуатации. В качестве примера на рис. 1 представлен шток Dresser – Rand (Германия).



Рис. 1. Внешний вид штока компрессора

Определение химического состава материала основы штока осуществляли оптико-эмиссионным методом [1]. Согласно результатам измерений, представленных в таблице 1, исследуемый шток изготовлен стали, российским аналогом которой, является сталь марки 45ХГМ, выплавляемая в России по ТУ предприятий.

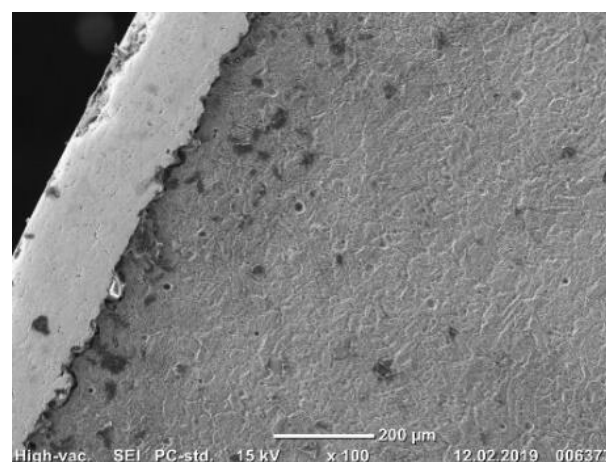
Для изучения возможных методов упрочнения рабочей поверхности штока использовали растровый электронный микроскоп JEOL JCM-6000 с электродисперсионным анализатором для выпол-

нения микрорентгеноспектрального анализа изучаемой поверхности [2].

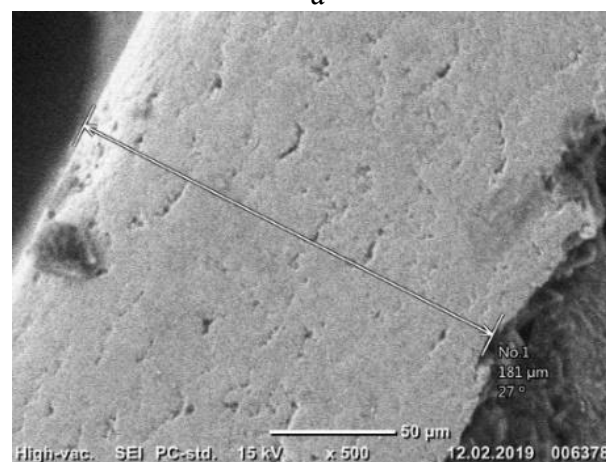
Таблица 1 – Результаты контроля химического состава материала основы

№	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
1	0,40	0,27	0,96	0,93	0,223	0,053
2	0,39	0,27	0,97	0,91	0,226	0,054
3	0,41	0,27	0,94	0,91	0,217	0,055
Среднее	0,40	0,27	0,96	0,92	0,218	0,054

В процессе исследования микроструктуры по всей периферии рабочей поверхности образца был зафиксирован поверхностный слой, структурно отличающийся от материала основы. Глубина покрытия варьируется в пределах 153 - 201 мкм и не имеет зоны термического влияния. На рисунке 2 представлена микроструктура образца и указана толщина покрытия.



а



б

Рис. 2. Результаты металлографических исследований: а-общий вид микроструктуры; б-строение поверхностного слоя

Для контроля химического состава покрытия применяли микрорентгеноспектральный анализ. На рисунке 3 представлена исследуемая область и состав спектра, соответствующий данной области исследования.

Согласно результатам таблицы 2 видно, что покрытие имеет вольфрамовую основу, в которой в качестве связки присутствует кобальт, а наличие хрома, ванадия, железа и углерода, позволяют прогнозировать дополнительное влияние карбидного и интерметаллидного механизма упрочнения.

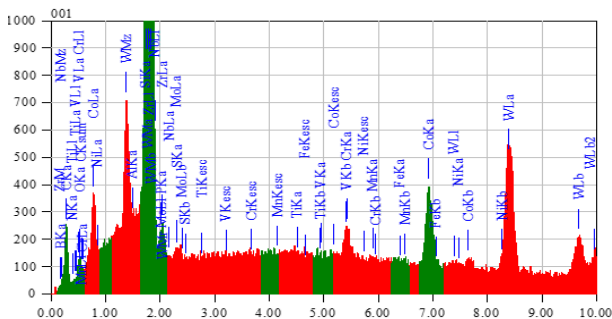
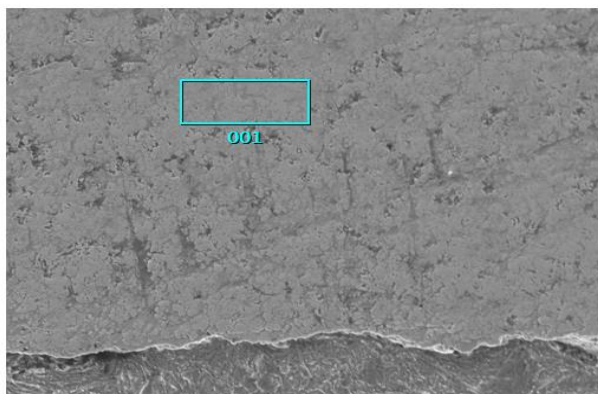


Рис. 3. Исследуемая область покрытия

Таблица 2 – Химический состав покрытия в области спектра 001, в % по массе

C	V	Cr	Mn	Fe	Co	W
2,06	0,19	1,66	0,11	0,32	6,83	87,86

Известно, что применение вольфрама достаточно широко практикуется в составе покрытий для защиты поверхности от различных видов интенсивного износа. Также вольфрам-содержащие слои отличаются высокой твердостью, прочностью на сжатие, модулем упругости, при этом сохраняют механические свойства в широком диапазоне температур, стойки к фрикционной коррозии и способствуют образованию

прочной связи с металлической основой [3,4].

Для безаварийной работы штоков компрессора покрытие должно иметь удовлетворительную дисперсную структуру и комплекс физико-механических характеристик, отвечающих условиям эксплуатации. Полученное покрытие должно быть износостойким, коррозионностойким, иметь высокую прочность сцепления с подложкой и не отслаиваться в процессе службы [9].

Для контроля механических величин основного материала штока компрессора, были проведены испытания на ударную вязкость [5], статическую прочность [6], твердость [7] и микротвердость [8]. Результаты представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 – Результаты механических испытаний основного металла штока

Наименование испытания	Среднее значение
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	347
Предел прочности σ_b , МПа	728
Относительное удлинение δ_5 , %	23,2
Относительное сужение, ψ , %	63,1
Ударная вязкость, КСU+20 Дж/см ²	62,5
Твердость, НВ	215

Таблица 4 – Результаты измерения микротвердости основного металла и напыленного покрытия

	Микротвердость, НВ	Среднее значение
Основной металл	от 306 до 572,4	416
Напыленный слой	от 1532 до 2566	2129

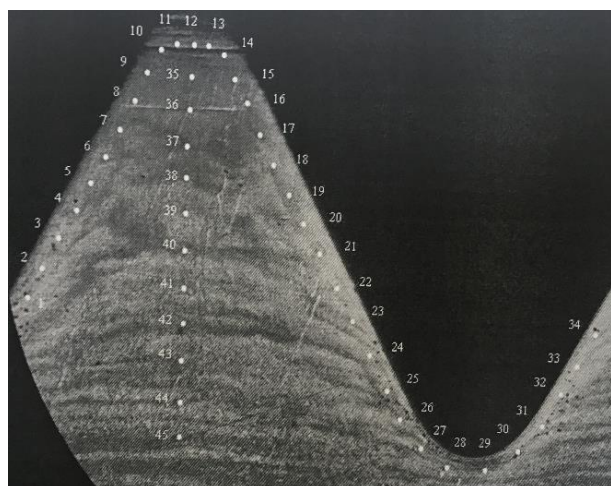
В связи с тем, что резба штоков, согласно предварительному анализу, является основной причиной выхода детали из строя, выполнен контроль упрочнения и микротвердости профиля зубьев резбы. Схема контроля и глубина упрочнения представлены на рис. 4.

Показано, что глубина упрочненного слоя, по всему профилю зубьев, составляет около 55 мкм. По результатам измерения микротвёрдости установлено:

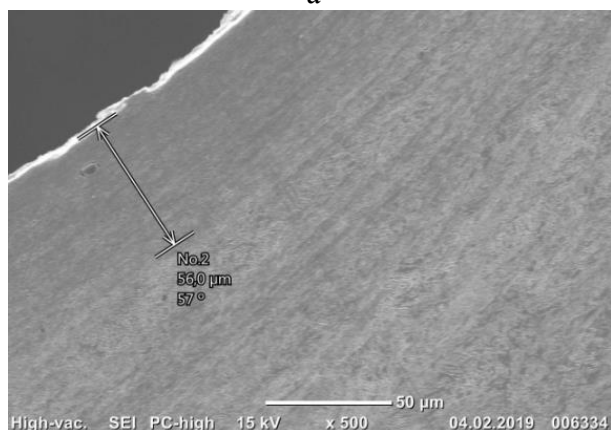
- микротвердость по периметру зубьев профиля резбы штока равномерная и варьируется в пределах 270 – 309 НВ (замеры по контрольным точкам, рис. 4 а), что свидетельствует о равномерности накатки резбовой

части изделия;

- микротвердость по оси зубьев уменьшается в направлении от края 292 HV к основанию 231 HV (участки не подвергшиеся деформации), что коррелирует со значениями твердости материала основы.



а



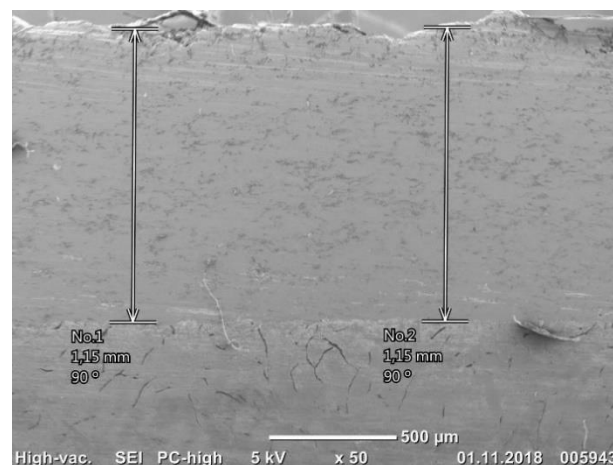
б

Рис. 4. Металлография резбовой части штока: а – контроль микротвердости по профилю резьбы, б – текстура в области накатки

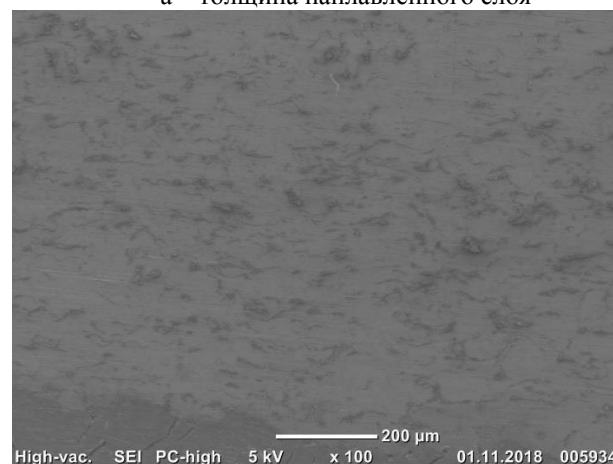
В условиях предприятия ООО «Технология» г. Оренбург стартовала опытно-промышленная технология нанесения покрытия на среднеуглеродистые легированные стали методом холодного газотермического напыления [10]. На рис. 5 представлены результаты металлографических исследований поверхностного слоя опытного образца, полученного данным методом.

Анализ структуры показал, что при газотермическом напылении удалось получить удовлетворительное сцепление покрытия с подложкой. Толщина покрытия опти-

мальна с точки зрения внутренних напряжений, варьируется в пределах от 1 до 1,3 мм. Известно, что с увеличением толщины более 1,5 мм возникают большие внутренние напряжения, которые приводят к отслаиванию покрытия.



а – толщина наплавленного слоя



б – структура наплавленной зоны, представлена металлической основой с карбидными включениями

Рис. 5. Структура поверхностного слоя, полученного холодным газотермическим напылением

Покрывение поучено из самофлюсующихся металлургических порошковых композиций, обеспечивающих пористость в пределах 5-7 %.

Так как механизм получения покрытия холодным газотермическим напылением напылением основан на высокоскоростном ударе расплавленных частиц о подложку металла, структура поверхностного слоя характеризуется образованием и затвердеванием ламелл параллельно подложке. Ламелли имеют толщину 5-7 мкм и прида-

ют покрытиям анизотропные свойства. Между ламелями имеются мелкие поры и окислы. Такая гетерогенная слоистая структура имеет меньшую прочность, чем исходный материал, но обладает преимуществами при трении и термоударах.

Вследствие большой шероховатости покрытия, чрезвычайно быстрого растекания и кристаллизации частиц при ударе в зоне контактов ранее нанесённых частиц с поверхностью остаются дефекты и полости. Взаимодействие с атмосферой, адсорбция газов и оседание пылевидных фракций существенно ухудшает свойства межслойной зоны покрытия. С уменьшением размера напыляемых частиц улучшается заполнение слоя покрытия – его плотность растёт, объём микропустот уменьшается, структура покрытия делается более однородной. В этой связи большое значение имеет выбор фракционного состава порошковых частиц. В данной работе размер фракции напыляемых порошковых материалов установлен в пределах 35-60 мкм, что в два раза меньше фракции наплавленных порошковых материалов (80-120 мкм).

В таблице 5 показаны результаты измерения микротвердости поверхностного слоя, полученного методом ХГТН.

Таблица 5 – Распределение микротвердости по толщине покрытия, полученного газотермическим напылением

Нагрузка 9,8 Н, шаг измерения 0,2 мм		Нагрузка 0,98 Н, шаг измерения 0,2 мм	
HV	HRC	HV	HRC
420,5 – 463,6	42 – 46	301,5 – 356,7	30 – 36
484,6 – 443,9	40 – 42	283 – 327,4	28 – 33
226,7 – 241,7	19 – 21	160,4 – 283,0	До 28
157,6 – 170,3	-	250,7 – 262,1	22 – 24

С учетом особенностей формирования покрытия методом газотермического напыления можно утверждать, что твёрдость в данном случае не является характеристикой, эквивалентной износостойкости материала. Напротив, сформированная в процессе напыления структура такова, что напылённое покрытие с низкой твёрдостью превосходит литой материал с высокой твёрдостью по износостойкости. В условиях абразивного износа покрытия из самофлю-

сующихся сплавов также показывают высокую стойкость. В частности, износостойкость покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе никеля (СНГН) в 4 раза выше износостойкости закаленной стали. При этом смазка легко распространяется по поверхности покрытия, прочно на ней удерживается и заполняет поры, наблюдается эффект самосмазывания покрытия [11]. Все эти факторы позволяют прогнозировать продолжительную безаварийную работу изделия, поверхность которого упрочнена с применением технологии ХГТН, в условиях сложного комбинированного изнашивания в присутствии агрессивных сред.

На основании проделанной работы сформулированы следующие выводы:

1. Согласно результатам проведенного реверс-инжиниринга, выявлены основные технологические процессы изготовления штоков дожимных компрессорных станций от зарубежного производителя.

2. Определены технологические этапы получения подобного изделия в рамках импортозамещения в условиях ООО «Технология» г. Оренбург.

3. Получен положительный результат в области получения качественного покрытия методом ХГТН, позволяющий приступить к отработке технологии получения и упрочнения штоков компрессорного оборудования в условиях производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Оренбургской области в рамках проекта «Внедрение в хозяйственный оборот машиностроительных предприятий Оренбургской области методологии конструкторско-технологической подготовки пресовых операций».

Список литературы

1. ГОСТ 7564-97. Сталь. Общие правила отбора проб, заготовок и образцов для механических и технологических испытаний — Введ. 1999-01-01 — М.: Изд-во стандартов, 12 с.
2. ГОСТ 10243-75. Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры — Введ. 1978-01-01 — М.: Изд-во стандартов, 41 с.
3. Самсонов Г. В., Витрянюк В. Н., Чаплыгин Ф. И. Карбиды вольфрама. — Киев: Наук. думка, 1974. — 127 с.
4. Pierson H. O. Handbook of Refractory Carbides and Nitrides. — New Jersey: Noyes Publications, 1996
5. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах — Введ. 1978-01-01 — М.: Изд-во стандартов, 12 с.
6. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. — Введ. 01-01-1986 — М.: Изд-во стандартов, 26 с.
7. ГОСТ 9012-59. Метод измерения твердости по Бринеллю. — Введ. 1960-01-01 — М.: Изд-во стандартов, 40 с.
8. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. — Введ. 1977-01-01 — М.: Изд-во стандартов, 35 с.
9. Видякин Ю.А., Доброклонский Е.Б., Кондратьев Т.Ф. Ополитные компрессоры. — 2-е, перер. И доп. — Л.: Машиностроение. Ленингр. Отделение, 1979. — 279 с., ил. — С. 137 — 141.
10. Газотермическое напыление. современное состояние и перспективы развития / Ю. А. Харламов, Л. Г. Полонский // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - 2016. - № 2. - С. 5-19
11. Свойства газотермических покрытий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.avcd.ru/svoystva-gazotermicheskikh-pokryitiy.html> — (Дата обращения: 25.05.2109).

References

1. GOST 7564-97. Steel. General rules for debugging samples, blanks and samples for mechanical and technological tests - Int. 1999-01-01 - M. : Standards Publishing House, 12 p.
2. GOST 10243-75. Steel. Test methods and evaluation of the macrostructure - Int. 1978-01-01 - M. : Standards Publishing House, 41 p.
3. Samsonov G.V., Vitryanyuk V.N., Cha-plygin F.I. Tungsten carbides. - Kiev: Sciences. Dumka, 1974. - 127 p.
4. Pearson H. O. Handbook of refractory carbides and nitrides. - New Jersey: Noyes Publications, 1996
5. Test method for impact bending at low temperature and high temperature - Int. 1978-01-01 - M.: Standards Publishing House, 12 p.
6. GOST 1497-84. Metals. Tensile test methods. - Enter 01-01-1986 — M.: Standards Publishing House, 26 p.
7. GOST 9012-59. Brinell hardness measurement method. - Enter 1960-01-01 - M.: Publishing house of standards, 40 p.
8. GOST 9450-76. Measurement of micro-hardness by indentation of diamond tips. - Enter 1977-01-01 - M.: Publishing House of Standards, 35 p.
9. Vidyakin Yu.A., Dobroklonsky EB, Kondratiev T.F. Opposite compressors. - 2nd, rer. And add. - L.: Mechanical Engineering. Leningrad Separate direction, 1979. - 279 pp., Il. - p. 137 - 141.
10. Thermal spraying. current state and development prospects / Yu. A. Kharlamov, L. G. Polonsky // The Bulletin of the National Ukrainian National University of Volodymyr Dahl. - 2016. - № 2. - p. 5-19
11. Properties of gas-thermal coatings [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.avcd.ru/svoystva-gazotermicheskikh-pokryitiy.html> - (Acquisition date: 25.05.2109).

УДК 62 - 822

КОМБИНИРОВАННЫЙ МУЛЬТИСИЛЬФОННЫЙ ГИДРОВЫТЕСНИТЕЛЬЕ.В. Пашков¹, В.П. Поливцев¹, М.И. Калинин¹, В.В. Поливцев¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация**Аннотация**

Проанализированы функциональные возможности моносильфонных и мультисильфонных гидровытеснителей, применяющихся в гидроприводах технологического промышленного и исследовательского оборудования при нормальных и высоких давлениях жидких сред. Обосновано создание и применение комбинированных мультисильфонных гидровытеснителей, позволяющих уменьшить потери давления, обусловленные упругой осевой деформацией сальфонов, снижающие точность передачи давления одной жидкой среды другой. Приведена методика определения числа сальфонов в конструкции гидровытеснителя. Описана конструкция и принцип работы комбинированного гидровытеснителя с восполняемым объемом вытесняемой жидкой среды.

Ключевые слова: гидровытеснитель, сальфон, жидкая среда, деформация, давление, разрежение.

COMBINED MULTICELLPHONE GIDROTECHNICALE.V. Pashkov¹, V.P. Polivtsev¹, M.I. Kalinin¹, V.V. Polivtsev¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation**Abstract**

Analyzed functionality monocellphone and multicellphone of hydrolytically used to guide reprovado technological industrial and research equipment at normal and high pressures of liquids. Justified with the building and the use of combined multicellphone hydrophytes visitors to reduce pressure loss due to elastic axial deformation of the bellows, which reduce the accuracy of the transmission of pressure of one fluid to another. The method of determining the number of SIL-backgrounds in the structure of the hydro-displacer is given. The design and principle of operation of the combined hydro-displacer with the replenished volume of the displaced liquid medium are described. The functional capabilities of mono-bellows and multi-bellows hydraulic propellants used in hydraulic drives of technological industrial and research equipment with normal and high pressures of liquid media are analyzed. The creation and use of combined multi-bellows hydraulic kinetics, allowing to reduce pressure losses caused by elastic axial deformation of bellows, reducing the accuracy.

Keywords: gidrotechnical, bellows, fluid environment, deformation, pressure, vacuum.

Введение. Сильфонные гидровытеснители (моносильфонные, мультисильфонные) (рис.1), это объемные гидромашины, предназначенные для преобразования энергии одного потока жидкой среды в энергию другого потока жидкой среды без изменения значения давления, т.е. давление p_1 на входе впускной полости объемом $V_{вп}$ равно давлению p_2 на выходе из выпускной полости объемом $V_{вып}$. Преобразование осуществляется с помощью металлических сальфонов 2, представляющих собой цилиндрические упругие гофрированные оболочки, прикрепленные одним концом к разделителю сред в виде диска 1 и размещенные в выпускной полости цилиндрического корпуса 3 [1].

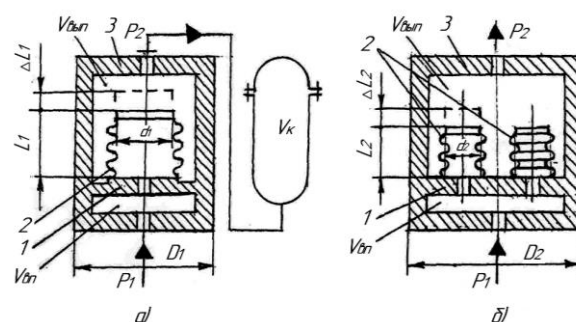


Рис.1. Гидровытеснители сальфонные: моносильфонный (а), мультисильфонный (б)

Их назначение - передача энергии одной жидкой, например, рабочей среды другой жидкой, например, технологической среде, которые отличаются по химическому составу или по физическим параметрам (плот-

ность, текучесть, вязкость), без их соприкосновения между собой, например, в гидроприводах промышленного технологического и исследовательского оборудования со специальными объемными герметичными камерами (сосудами) с заданными величинами давления, обеспечивающего протекание соответствующего технологического процесса [2].

Изменение давления в полости камеры объемом V_k , полностью заполненной под нормальным давлением технологической жидкостью, т.е. обезвоздушенной, зависит от объема ΔV вытесненной технологической жидкости из выпускной полости гидравлического теснителя, объемом $V_{\text{вып.}}$.

Без учета потерь на осевую деформацию сильфонов, для моносильфонного гидравлического теснителя (рис.1, а)

$$\Delta V = (\pi d_1^2 / 4) \Delta L_1,$$

а для мультисильфонного гидравлического теснителя (рис. 1,б)

$$\Delta V = n (\pi d_2^2 / 4) \Delta L_2,$$

где d_1 и d_2 – диаметры сильфонов; ΔL_1 и ΔL_2 – величины осевой деформации сильфонов (от 5 до 15% длины сильфонов в свободном состоянии); n – число сильфонов в конструкции гидравлического теснителя при принятом $\Delta L = 0,1 L$, определяется с помощью выражения

$$n = \Delta V_k / \Delta V = (12,7 \beta V_k p) / (d_2^2 L_2);$$

ΔV_k – вытесняемый в камеру объем технологической среды, обеспечивающий достижение заданной величины давления, определяется с помощью выражения [3]

$$\Delta V_k = V_k p \beta;$$

p – заданная величина давления в камере, Па; β – коэффициент сжатия технологической жидкой среды, 1/Па (например, для воды $\beta = 47,5 \cdot 10^{-11}$ 1/Па).

Так, например, для достижения давления технологической жидкой среды $p = 15 \text{ МПа}$ в камере объемом $1,0 \text{ м}^3$ (100 литров) с таким же, как и у воды коэффициентом сжатия, в ее полость необходимо вытеснить жидкую среду объемом $\Delta V_k \approx 0,74 \times 10^{-3} \text{ м}^3 \approx 0,74$ литра.

Использование для этого моносильфонного гидравлического теснителя с максимальным среди гостовских однослойных и многослойных сильфонов диаметром $D = 190 \text{ мм}$, длиной $L = 164 \text{ мм}$, с допустимым осевым ходом $\Delta L = 21 \text{ мм}$ и с минимальной жесткостью, равной $2,04 \text{ кгс/мм}$, способным вытеснить технологическую среду объемом $\Delta V \approx 0,69 \times 10^{-3} \text{ м}^3 \approx 0,69$ литра, не позволяет достичь поставленной цели [4, 5].

Решение поставленной задачи возможно с помощью мультисильфонного гидравлического теснителя с числом сильфонов $n = 6$, диаметром $D = 100 \text{ мм}$, длиной $L = 107,5 \text{ мм}$, с осевым ходом $\Delta L = 15 \text{ мм}$ и с жесткостью, равной $0,22 \text{ кгс/мм}$, каждый из которых обеспечивает вытеснение технологической среды объемом $\Delta V \approx 0,12 \times 10^{-3} \text{ м}^3 \approx 0,12$ литра.

Как преобразователь энергии данный гидравлический теснитель характеризуется более высокой чувствительностью и точностью за счет меньших потерь давления рабочей среды, затрачиваемого на деформацию сильфонов в осевом направлении, однако увеличение числа сильфонов приводит к увеличению диаметра корпуса ($D_2 > D_1$), а следовательно к увеличению металлоемкости, что связано с необходимостью увеличения толщины его стенок для обеспечения необходимой прочности в условиях высокого давления рабочей и технологической среды [6].

Рассмотренные схемы моносильфонного и мультисильфонного гидравлических теснителей предназначены для использования в гидроприводах промышленного и исследовательского оборудования только с одной камерой (сосудом) высокого давления, т.е. имеют ограниченные функциональные возможности, и характеризуются ограниченным диапазоном объемов вытесняемой технологической среды, зависящих от максимально допустимого рабочего хода (деформации) сильфонов.

Результаты. Конструкция комбинированного мультисильфонного гидравлического теснителя и схема его подключения к двум камерам (сосудам) разного объема (рис. 2), характеризуются наличием контура высокого давления и контура низкого давления (менее

6 МПа), обеспечивающих два режима работы гидравлического насоса [7, 8].

При первом режиме, аналогичном режиму работы описанного выше мультисильфонного гидравлического насоса, используется только контур высокого давления, который включает в себя сборный корпус, состоящий из двух цилиндрических чашек 23 и 30 с соединительными фланцами 40 по краям, соосно и оппозитно расположенными относительно друг друга донными частями наружу, и образующими с размещенным между ними разделителем рабочих сред в виде диска 39 впускную и выпускную герметичные полости объемом $V_{вп}$ и $V_{вып}$, соответственно.

Впускная полость соединена с помощью отверстия 43, трубопровода 44, отсечного клапана 18 с одним из выходов четырехлинейного трехпозиционного гидрораспределителя с электромагнитным управлением 10, вход которого подключен через пропорциональный регулятор расхода 4 к гидронасосу 2.

Выпускная полость (в качестве примера) соединена с помощью отверстия 36, трубопровода 37 и отсечных клапанов 42 и 45 с полостями сосудов (камер) высокого давления 41 и 46, соответственно, имеющих разные объемы V_1 и V_2 .

К разделительному диску со стороны выпускной полости прикреплены с помощью отверстий одних из своих концов сальфоны 27, а отверстия их других, свободных концов закупорены с помощью сварки вставленными в них пробками в виде дисков 28. Образованные таким образом внутренние герметичные полости сальфонов соединены отверстиями 25 с впускной герметичной полостью корпуса гидравлического насоса. Перемещения свободных концов сальфонов при упругом растяжении ($+\Delta L$) и упругом сжатии ($-\Delta L$) ограничиваются жесткими упорами 29 и 26, соответственно.

Для реализации второго режима работы подключается контур низкого давления, образованный четырехлинейным трехпозиционным гидрораспределителем с электромагнитным управлением 12 с одной заглушенной линией выхода, вход которого соединен с помощью трубопровода 13 и отверстия 24

с впускной полостью гидравлического насоса, а другой выход, с помощью трубопровода 20 и каналов 22 в донной части чашки соединен герметичными полостями сальфонов 21, прикрепленных к чашке симметрично ее оси одними концами. Между ними расположен сальфонный гидроцилиндр 15, также прикрепленный к этой чашке одним из своих концов. Другими концами эти сальфоны и сальфонный гидроцилиндр прикреплены к траверсе 17, установленной с возможностью перемещения по снабженным ограничителям хода 14 направляющим 19, закрепленным на корпусе гидравлического насоса параллельно его оси. Герметичная полость сальфонного гидроцилиндра соединена посредством гибкого трубопровода 16 со входом трехлинейного двухпозиционного гидрораспределителя с электромагнитным управлением 11, один из выходов которого подключен через отсечной клапан 7 с помощью трубопровода 6 ко входу переливного клапана 5 и к другому выходу гидрораспределителя 10.

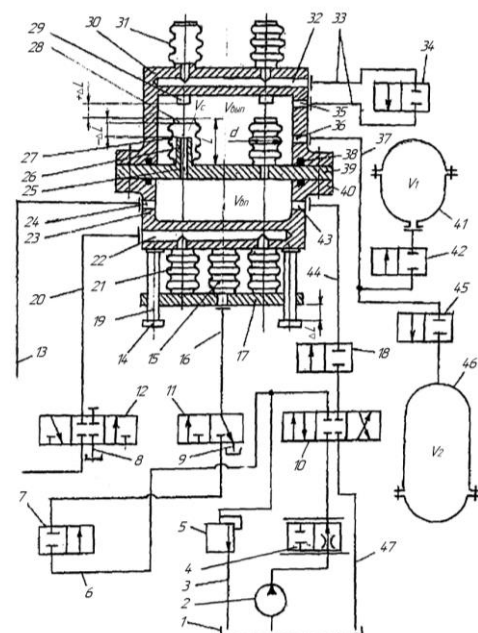


Рис.2. Конструкция и схема подключения комбинированного мультисильфонного гидравлического насоса к камерам разного объема

В контур низкого давления входят также гидроаккумуляторы 31 с упругими корпусами в виде сильфонов, прикрепленные с внешней стороны донной части чашки, герметичные полости которых соединены с образованной этой чашкой выпускной полостью посредством каналов 32, трубопроводов 33, отсечного клапана 34 и отверстия 35.

Герметизация полостей обеспечивается кольцевыми уплотнениями 38, установленными в кольцевых канавках на обращенных к разделительному диску торцовых поверхностях чашек, причем канавки для предотвращения выдавливания колец в уплотняемые зазоры выполнены закрытыми в радиальных направлениях.

Отвод рабочей среды от гидрораспределителей и сливного клапана в гидробак 1 обеспечивается с помощью сливных трубопроводов 8, 9, 3 и 47.

Все входящие в конструкцию гидровытеснителя сильфоны 27, 21, 15 и 31 имеют одинаковые размерные параметры, а количество сильфонов 27, 21 и 31 одинаковое.

Перед началом выполнения цикла вытеснения из впускной и выпускной полости, а также из полостей камер (сосудов) 41 и 46 удаляется воздух, и они заполняются полностью технологической жидкой средой под одинаковым давлением.

При вытеснении технологической среды в полость сосуда 41 объемом V_1 используется первый контур. При этом отсечные клапаны 45, 6 и 34 перекрыты, гидрораспределитель 12 находится в нейтральном положении и перекрывает трубопроводы 13, 20, гидрораспределитель 11 переключен в крайнее левое положение и работает на слив. Гидрораспределитель 10 переключается из нейтрального в левое крайнее положение, отсечные клапаны 18 и 42 открыты и находящаяся в баке 1 рабочая жидкая среда с помощью гидронасоса 2 под давлением поступает через пропорциональный регулятор расхода 4, гидрораспределитель 10, отсечной клапан 18, трубопровод 44 и отверстие 43 во впускную полость корпуса и соединенные с ней отверстиями 25 полости сильфонов 27, имеющих в свободном состоянии длину L , которые заполняются, сильфоны

деформируются (растягиваются) в осевом направлении на величину $+\Delta L$, осуществляя вытеснение из выпускной полости корпуса части находящейся в ней технологической жидкой среды под давлением в полость камеры 41, объем (расход) которой зависит от диаметра сильфонов d и величины удлинения $+\Delta L$.

Максимальная величина растяжения сильфонов в пределах упругой деформации ограничена жесткими упорами 29.

Отсутствие перепада давлений в полостях исключает деформацию (раздутие) сильфонов в радиальном направлении.

Для отключения подачи рабочей среды во впускную полость корпуса, а, следовательно, и в соединенные с ней полости сильфонов, гидрораспределитель 10 переключается в крайнее правое положение, отсоединяя впускную полость от источника давления (гидронасоса) и соединяя ее со сливным трубопроводом 47, вызывая тем самым падение в ней давления. Под действием накопленной в сильфонах при растяжении энергии упругой деформации и поступающей под давлением в выпускную полость из полости камеры 41, они сжимаются до размера L в осевом направлении, возвращаясь тем самым в исходное свободное состояние и создавая в выпускной полости разрежение, т.е. падение давления находящейся в ней технологической среды, вызывающее всасывание в нее технологической среды, находящейся в полости камеры 41, объем которой равен вытесненному ранее объему. Поступающая от гидронасоса рабочая жидкая среда возвращается в бак 1 через переливной клапан 5.

В случае необходимости обеспечения такого же давления в камере 46 с полостью объемом V_2 , например, в два раза превосходящим объем V_1 камеры 41, необходимо вытеснить из выпускной полости при том же количестве сильфонов с такими же размерными параметрами в два раза больший объем технологической жидкой среды путем увеличения в два раза длины рабочего хода в пределах допустимых упругих деформаций сильфонов при растяжении и сжатии, что

обеспечивается подключением контура низкого давления следующим образом.

Отсечные клапаны 18 и 42 закрыты, отсечные клапаны 45, 7 и 34 открыты, гидрораспределитель 12 переключен в крайнее левое положение, а гидрораспределители 10 и 11 переключены в крайнее правое положение. Рабочая среда от гидронасоса 2 поступает через пропорциональный регулятор расхода 4, гидрораспределитель 10, отсечной клапан 7 и гидрораспределитель 11 в полость сильфона 15, вызывая его упругое растяжение и перемещение траверсы 17 на величину ΔL по направляющим 19 до упора в ограничители хода 14. Требуемый уровень низкого давления обеспечивается переливным клапаном 5, подключенным к трубопроводу 6 и осуществляющим отвод лишнего количества рабочей среды по сливному трубопроводу 3 в бак 1.

Прикрепленные концами к траверсе 17 и дну чашки 23 сильфоны 21 растягиваются, объем их полостей увеличивается, и благодаря свойству неразрывности жидкого потока в них создается разрежение, вызывающее всасывание в них через канал 22, гидрораспределитель 12, трубопроводы 13, 20 и отверстие 24 рабочей среды, находящейся в впускной полости и создание разрежения, которое в свою очередь вызывает всасывание в нее через отверстия 25 из полостей сильфонов 27 заполняющей их рабочей среды и, как следствие, упругое сжатие сильфонов на величину $-\Delta L$ до контакта их пробок 28 с упорами 26.

Упругое сжатие сильфонов 27 создает разрежение в выпускной полости. Происходит всасывание в нее через отверстие 35 и отсечной клапан 34, по трубопроводам 33 и каналу 32 технологической среды из полостей гидроаккумуляторов 31 в виде сильфонов, которые при этом упруго сжимаются, т.е. происходит восполнение объема технологической среды после его уменьшения вследствие сжатия сильфонов 27.

После этого происходит закрытие отсечного клапана 34, перевод в нейтральное (центральное) положение гидрораспределителя 12, перекрывающего трубопроводы 13 и 20, открытие отсечного клапана 18 и пере-

ключение гидрораспределителя 10 в крайнее правое положение, обеспечивающее поступление рабочей среды от гидронасоса 2 по трубопроводу 44 во впускную полость корпуса и далее в полости предварительно сжатых сильфонов 27, свободные концы которых упруго перемещаются в осевом направлении на величину

$$2\Delta L = |+\Delta L| + |-\Delta L|,$$

где $|+\Delta L|$ и $|-\Delta L|$ – абсолютные значения соответственно допустимых величин упруго растяжения и сжатия сильфонов, принимаемые в пределах 15% от их длины в свободном состоянии. Таким образом, суммарная величина упругого перемещения $2\Delta L$ будет составлять 30% от длины сильфонов в свободном состоянии, а, следовательно, вытеснять в два раза больший объем технологической среды, обеспечивая при этом достижение заданного в рассматриваемом примере давления в 15 МПа.

Для снятия давления технологической среды в полости сосуда 46, гидрораспределители 10 и 12 переключаются в правое крайнее положение, а гидрораспределитель 11 в крайнее левое, отсечной клапан 7 закрывается, отсечной клапан 40 открывается, а отсечной клапан 7 остается открытым. Давление во впускной полости падает, сильфоны 27 упруго сжимаются до свободного состояния, вытесняя находящуюся в их полостях и сообщаемой с ними впускной полости рабочую среду через отверстие 43, трубопровод 44, гидрораспределитель 10 и трубопровод 47 в бак 1. Параллельно происходит упругое сжатие сильфонов 21, вызывающее вытеснение из их полостей рабочей среды через канал 22, трубопровод 20, гидрораспределитель 12 и трубопровод 8 в бак 1, а также упругое сжатие сильфона 15, вызывающее вытеснение из его полости рабочей среды через гибкий трубопровод 16, гидрораспределитель 11 и трубопровод 9 в бак 1. Траверса 17 возвращается в исходное положение.

Упругое сжатие сильфонов 27 вызывает уменьшение объема технологической среды в выпускной полости, которое компенсируется поступлением в нее технологической

среды из полости сосуда 46 в объеме, равном ранее вытесненному. При этом половина этого объема технологической среды остается в выпускной полости, а половина всасывается в полости упруго разжимающихся до свободного состояния сильфонов гидроаккумуляторов 31.

Второй режим работы используется также при поочередном вытеснении одинакового объема технологической среды в две одинаковые камеры объемом V_1 с целью создания в них одинакового давления.

Заключение. Комбинированный мультисильфонный гидрораспределитель, благодаря наличию контуров высокого и низкого давления и двум режимам работы, характеризуется расширенными функциональными возможностями, позволяющими эффективно его использовать как в составе гидроприводов промышленных технологических установок, так и в составе научного оборудования для проведения исследований технологических процессов, протекающих при высоких давлениях жидких сред, характеризующихся повышенной токсичностью и не допускающих контакта с окружающей средой.

Список литературы

1. ГОСТ 17752–81 (СТ СЭВ 2455–80). Гидропривод объемный и пневмопривод. Термины и определения (с Изменениями №1,2).
2. Герц Е.В. Пневматические устройства и системы в машиностроении: Справочник. / Е.В. Герц, А.И. Кудрявцев, О.В. Ложкин. – Москва: Машиностроение, 1981. – 64 с.
3. Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. / Б.Б. Некрасов, Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев. – Минск, Высшая. школа, 1976. – 12 с.

4. ГОСТ 22388 – 90. Сильфоны однослойные.
5. ГОСТ 21744 – 83. Сильфоны многослойные металлические.
6. Лизин В.Т. Проектирование тонкостенных конструкций. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.Т. Лизин, В.А. Пяткин. – Москва: Машиностроение, 1985. – 344 с.
7. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник. – 5-е изд., перераб. и доп. / В.К. Свешников. – Москва: Машиностроение, 2008. – 640с.
8. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов. – 2-е изд., перераб. / Т.М. Башта. – Москва: Машиностроение, 1982. – 423 с.

References

1. GOST 17752 – 81 (ST SEV 2455 – 80). Hidroprivod ob'emnyiy i pnevmoprivod. Terminy i opredeleniya (s Izmeneniyami #1, 2).
2. Pnevmaticheskie ustroystva i sistemy v mashinostroenii: Spravoch-nik / E.V.Gerts, A.I.Kudryavtsev, O.V.Lozhkin i dr. Pod obsch. red. E.V.Gerts. – M.: Mashinostroenie, 1981. – S.64, glava 3, razdel 3.1. Pnevmoxyitesniteli.
3. Vilner Ya.M., Kovalev Ya.T., Nekrasov B.B. Spravochnoe posobie po gidravlike, gidromashinam i gidroprivodam. Pod red. B.B.Nekrasova. Minsk, Vyishyaysh. Shkola, 1976. – S.12, razdel 1.2 .
4. GOST 22388 – 90. Silfonyi odnosloynnye.
5. GOST 21744 – 83. Silfonyi mnogosloynnye metallicheskie.
6. Lizin V.T., Pyatkin V.A. Proektirovanie tonkostennyih konstruktsiy. 2- e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie,1985. – 344 s.
7. Sveshnikov V.K. Stanochnyie gidroprivodyi: spravochnik / V.K. Svesh-nikov. – 5-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 640s.
8. Gidravlika, gidromashinyi i gidroprivodyi: ucheb-nik dlya mashino-stroitelnyih vuzov / T.M. Bashta [i dr.]. – 2-e izd., pererab. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 423 s.

УДК 621.923:621.90.17

СИНТЕЗ ПОДСИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ

С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы построения динамической системы для оценки состояния операции плоского шлифования с учетом статистических характеристик возмущений. Для построения фильтра Калмана-Бьюсси разработана программа, позволяющая решать уравнения Риккати объекта и фильтра. Выполнен расчет коэффициентов фильтра Калмана-Бьюсси для стационарного режима процесса плоского шлифования. Это позволяет оценивать состояние системы в реальном масштабе времени, причем даже в случае измерения лишь одной координаты фильтр дает оценки всех координат, а максимальные ошибки оценивания не превышают 10%.

Ключевые слова: операция шлифования, технологическая система, стохастический наблюдатель, фильтр Калмана-Бьюсси, уравнения Риккати, дисперсия оценок.

SYNTHESIS OF THE SUBSYSTEM OF SUPERVISION FOR GRINDING OPERATION

S.M. Bratan¹, A.O. Kharchenko¹, E.A. Vladetskaya¹

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The article discusses the issues of building a dynamic system for assessing the state of a flat grinding operation, taking into account the statistical characteristics of the disturbances. To build the Kalman-Bucy filter, a program has been developed that allows solving the Riccati equations of the object and the filter. The calculation of the Kalman-Bussu filter coefficients for the stationary mode of the flat grinding process has been performed. This allows you to assess the state of the system in real time, and even in the case of measuring only one coordinate, the filter gives estimates of all coordinates, and the maximum estimation errors do not exceed 10%.

Keywords: grinding operation, technological system stochastic observer, Kalman-Bussu filter, Riccati equations, variance of estimates.

Одним из распространенных методов обработки деталей является плоское шлифование. Достижение заданных параметров качества при обработке возможно за счет учета динамики технологической системы.

На основе анализа взаимодействия элементов динамической системы с учетом представления процесса шлифования в форме [1] можно построить описание динамики процесса обработки в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 (x_{10} + x_1) +_3 (\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + \\ + c_3 (x_{10} + x_1 + R + \Delta R) - \\ - h_3 (\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) - c_3 (x_{20} + x_2 - \\ - k - \Delta k) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 (x_{20} + x_2) + \\ + h_3 (\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) + c_3 (x_{20} + x_2 - \\ - k - \Delta k) - h_3 (\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - \\ - c_3 (x_{10} + x_1 + R + \Delta R) - \\ - h_2 \dot{L} - c_2 (L + \Delta L) = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где m_1, m_2 , – приведенные массы заготовки с приспособлением и круга со шпинделем; h_i – коэффициент сопротивления i -го звена; C_i – коэффициент жесткости i -го звена; x_{10}, x_{20}

, x_1, x_2 – координаты центра вращения круга и базовой поверхности детали и их приращения соответственно; R – радиус круга; k – соответствующий линейный размер детали; $\Delta R, \Delta k$ – вариации радиуса круга и линейного размера заготовки, соответственно; $L, \Delta L$ – расстояние от базовой поверхности детали до центра вращения круга и его изменение по лимбу станка.

С учетом условий силового замыкания технологической системы при номинальных режимах обработки можно построить соотношения, характеризующие динамику процесса в вариациях:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3 (\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + c_3 (x_1 + \Delta R) - h_3 (\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) - c_3 (x_2 - \Delta k) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 + h_3 (\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) + c_3 (x_2 - \Delta k) - h_3 (\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - c_3 (x_1 + \Delta R) - h_2 \dot{L} - c_2 \Delta L = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Систему (2) целесообразно представить в форме пространства состояний в форме Фробениуса:

$$\dot{Z}_0 = A_0 Z_0 + B_0 W_0 + C_0 U_0$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_3}{\alpha_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \end{bmatrix} (R_1 + R_2) + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} S, \quad (3)$$

где $z_1 = x_1$, $z_2 = z_1 p = \dot{x}_1$, $z_3 = z_2 p = \ddot{x}_1$,

$z_4 = z_3 p = \ddot{\ddot{x}}_1$, $z_5 = z_4 p = \ddot{\ddot{\ddot{x}}}_1$,

$R_1 = \Delta R$; $R_2 = \Delta k$; $\Delta L = S$;

$\lambda_1 = \beta_2$; $\lambda_2 = \beta_1 - \alpha_3 \lambda_1$; $\lambda_3 = \beta_0 - \alpha_3 \lambda_2 - \alpha_2 \lambda_1$;

$\gamma_1 = -\chi_3$; $\gamma_2 = -\chi_2 - \alpha_3 \gamma_1$; $\gamma_3 = -\chi_1 - \alpha_3 \gamma_2 - \alpha_2 \gamma_1$;

$\gamma_4 = -\chi_0 - \alpha_3 \gamma_3 - \alpha_2 \gamma_2 - \alpha_1 \gamma_1$;

$\alpha_4 = (m_1 m_2)$; $\alpha_3 = (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1)$;

$\alpha_2 = (h_2 h_3 + h_1 h_3 + h_1 h_2 + c_1 m_2 + c_3 m_1 + c_3 m_2 + c_2 m_1)$;

$\alpha_1 = (c_2 h_3 + c_1 h_2 + c_2 h_1 + c_3 h_2 + c_1 h_3 + c_3 h_1)$; $\alpha_0 = (c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3)$;

$\chi_3 = h_3 m_2$; $\chi_2 = (c_3 m_2 + h_2 h_3)$;

$\chi_1 = (c_3 h_2 + c_2 h_3)$; $\chi_0 = c_2 c_3$;

$\beta_2 = h_2 h_3$; $\beta_1 = (h_2 c_3 + h_3 c_2)$; $\beta_0 = c_2 c_3$.

Управляемость по Калману системы (3) может быть проанализирована непосредственно, с использованием численных значений вышеуказанных параметров для матриц объекта A_0 и управления C_0 .

Анализ работ области исследования динамики процессов шлифования [2, 3], показывает, что наиболее нестабильным звеном рассматриваемой динамической системы является шлифовальный круг. В соответствие с моделью (2), основными параметрами шлифовального круга, оказывающими влияние на динамику процесса обработки, являются статические и динамические вариации его профиля. Под статическими вариациями понимаются отклонения формы круга от идеальной в статическом режиме, а под динамическими – отклонения формы, вызываемые непосредственно процессом обработки. К последним можно отнести и отклонения траектории поверхности круга от заданных вследствие его дисбаланса. Эти отклонения имеют детерминированный характер и могут быть существенно уменьшены известными технологическими методами, например, предварительной балансировкой круга. Отклонения формы шлифовального круга в статическом режиме имеют случайный характер и при анализе процесса обработки могут быть учтены путем введения в состав системы (3) дополнительного звена – соответствующего формирующего фильтра. Такой фильтр может быть построен, например, на основе анализа профиля для любого конкретного шлифовального круга [4], с представлением воздействия на систему (3) в пространстве состояний в виде уравнений состояния (4) и наблюдения (5):

$$\dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1, \quad (4)$$

$$y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2 \quad (5)$$

где $G_1 = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{1}{T_1^2} \end{bmatrix},$

$$B_1 = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2 T_3 \end{bmatrix}, \quad D_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T, \quad E_2 = \rho,$$

w_1, v_2 – некоррелированные единичные, порождающие гауссовские белые шумы,

$$T_1 = \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)},$$

$$T_3 = \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}, \quad K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}},$$

D – дисперсия высот неровностей рельефа шлифовального круга, v – скорость его движения, α, β – соответствующие коэффициенты корреляции.

С учетом $w_0 = y_1$ при введении формирующего фильтра (4) система (3) приобретает вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_o = A_o z_o + B_o y_1 + C_o u_o \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 W_1 \\ y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2 \\ y_o = H_o z_o + E_o v_o \end{cases} \quad (6)$$

откуда непосредственно следует

$$\begin{cases} \dot{x}_o = A_o x_o + B_o D_1 G_1 + B_o E_2 v_2 + C_o u_o \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 W_1 \end{cases}$$

что позволяет представить уравнения состояния процесса шлифования с учетом возмущений, определяемых статистическими характеристиками круга как состояния расширенного объекта в виде:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{z}_o \\ \dot{G}_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_o & B_o D_1 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_o \\ G_1 \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} B_o E_2 & 0 \\ 0 & B_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_2 \\ W_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_o \\ 0 \end{bmatrix} \times u_o \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_3}{\alpha_4} & \gamma_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{1}{T_1^2} \end{bmatrix} \times \\ &\times \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho\gamma_1 & 0 \\ \rho\gamma_2 & 0 \\ \rho\gamma_3 & 0 \\ \rho\gamma_4 & 0 \\ 0 & k_1 T_3 \\ 0 & -1 - kT_2 T_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_2 \\ W_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times S \end{aligned} \quad (7)$$

Решение задач оптимального управления операциями шлифования предполагает возможность точного измерения всех переменных состояния объекта и наличие полной априорной информации о параметрах технологической системы. Анализ операции шлифования показывает, что необходимые для управления объектом фазовые координаты измеряются с существенными случайными ошибками или не измеряются вообще, при этом движение объекта управления подвержено случайным воздействиям. Поэтому при решении задач управления применение детерминированных методов не приемлемо. В такой ситуации необходимо иметь результаты оценивания состояния технологической системы, которые имеют статистическую связь с данными наблюдений.

Для построения стохастического наблюдателя рассмотрим зависимости (7), (6). Обозначим через

$$Z(t) = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} - \text{вектор состояния системы,}$$

$$U(t) = S - \text{управление, } W(t) = \begin{bmatrix} V_2 \\ W_1 \end{bmatrix} - \text{вектор}$$

случайных воздействий, $v(t) = v_0$ – вектор случайных помех, сопровождающих измерения,

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_3}{\alpha_4} & \gamma_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix}$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} \rho\gamma_1 & 0 \\ \rho\gamma_2 & 0 \\ \rho\gamma_3 & 0 \\ \rho\gamma_4 & 0 \\ 0 & k_1 T_3 \\ 0 & -1 - k_2 T_3 \end{bmatrix}, \quad C(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$H(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ – соответствующие им матрицы.

Тогда уравнения движения системы и измеряемых выходных координат переписываются как

$$\begin{cases} \dot{z} = A(t)z(t) + B(t)W + C(t)u(t) \\ y(t) = H(t)z(t) + E(t)v(t) \end{cases} \quad (8)$$

Графическая интерпретация системы (8) представлена на рис. 1.

Считаем, что случайные воздействия w и помехи v являются случайными гауссовскими процессами типа белого шума с нулевыми математическими ожиданиями $M[w(t)] = 0$, $M[v(t)] = 0$, тогда их корреляционные матрицы описываются выражениями:

$$\begin{aligned} \text{cov}[w(t), w(\tau)] &= M[w(t) w^T(\tau)] = \\ &= Q(t)\delta(t - \tau), \\ \text{cov}[v(t), v(\tau)] &= M[v(t) v^T(\tau)] = \\ &= R(t)\delta(t - \tau), \end{aligned}$$

где $\delta(t)$ – дельта-функция Дирака; $Q(t)$ – симметричная, неотрицательно определенная матрица интенсивности белого шума системы $w(t)$; $R(t)$ – симметричная, положительно определенная матрица интенсивности белого шума измерений $v(t)$.

Учитывая, что начальное состояние системы $z(t_0)$ – есть случайный гауссовский вектор с известным математическим ожида-

нием $M[z(t_0)] = \bar{z}_0$ и корреляционной матрицей

$$\begin{aligned} \text{cov}[z(t_0), \bar{z}_0(t_0)] &= \\ &= M\{[z(t_0) - \bar{z}_0][z(t_0) - \bar{z}_0]^T\} = P(t_0, t) = P_0, \end{aligned} \quad \text{а}$$

также то, что случайные воздействия и погрешности измерений при всех $t \geq t_0$ взаимно не коррелированы [5-8]:

$$\begin{aligned} \text{cov}[z(t_0), w(t)] &= M\{[(t_0) - \bar{z}(t_0)]w^T(t)\} = 0, \\ \text{cov}[z(t_0), v(t)] &= M\{[(t_0) - \bar{z}(t_0)]v^T(t)\} = 0, \\ \text{cov}[w(t), v(\tau)] &= M[w(t) v^T(\tau)] = 0, \end{aligned}$$

найдем линейную несмещенную оценку вектора

$$Z(t) = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix},$$

построенную на основе результатов наблюдений $y(\tau), (t_0 \leq \tau \leq t)$.

Обозначим эту оценку через $\hat{x}(t) = \hat{z}(t)$. Такая оценка может быть получена на выходе фильтра, описываемого векторным дифференциальным уравнением [5]:

$$\dot{\hat{x}}(t) = F(t) + G(t)u(t) + K(t)y(t) \quad (9)$$

с ошибкой оценивания

$$e(t) = z(t) - \hat{x}(t). \quad (10)$$

Чтобы процесс на выходе фильтра был несмещенной оценкой, должно выполняться равенство

$$M[\hat{z}(t)] = M[z(t)] = \bar{z}(t). \quad (11)$$

Вычисляя математическое ожидание обеих частей уравнения (10), получим: $M[\dot{\hat{x}}(t)] = F(t)M[\hat{x}(t)] + G(t)u(t) + K(t)M[y(t)]^T$ тогда, учитывая, что

$$M[y(t)] = H(t)M[z(t)],$$

на основании (11) дифференциальное уравнение для среднего значения вектора состояния системы запишется

$$\dot{\bar{z}}(t) = [F(t) + K(t)H(t)]\bar{z}(t) + G(t)u(t). \quad (12)$$

После вычисления математического ожидания от обеих частей уравнения (8) получим уравнение для среднего значения вектора состояния технологической системы $\dot{\bar{z}} = A(t)z(t) + C(t)u(t)$ или

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_3}{\alpha_4} & \gamma_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times S \quad (13)$$

Сравнивая (12) и (13), запишем первое условие несмещенности оценки вектора состояния с помощью рассматриваемого фильтра

$$F(t) = A(t) - K(t)H(t); \quad G(t) = C(t). \quad (14)$$

Второе условие состоит в том, чтобы уравнения (11) и (12) решались при одном и том же начальном условии

$$\bar{z}_0 = M \left[\hat{z}(t_0) \right] = M [z(t_0)] = \bar{z}_0. \quad (15)$$

Если выполнить условия несмещенности (14) и (15), то уравнение фильтра (9) примет вид:

$$\begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \\ \hat{z}_3 \\ \hat{z}_4 \\ \hat{\psi}_1 \\ \hat{\psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_3}{\alpha_4} & \gamma_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \\ \hat{z}_3 \\ \hat{z}_4 \\ \hat{\psi}_1 \\ \hat{\psi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times S + \begin{bmatrix} K_1(t) \\ K_2(t) \\ K_3(t) \\ K_4(t) \\ K_5(t) \\ K_6(t) \end{bmatrix} \times \left(y(t) - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \\ \hat{z}_3 \\ \hat{z}_4 \\ \hat{\psi}_1 \\ \hat{\psi}_2 \end{bmatrix} \right) \quad (16)$$

$x_0 = \bar{z}_0$

В выражении (16) остается неизвестной матрица коэффициентов усиления фильтра $K(t)$, обеспечивающего оптимальную оценку, при которой составляющие ошибки оценивания имеют минимальную дисперсию.

Матрица коэффициентов такого фильтра определяется выражением [5]:

$$K(t) = P(t)H^T(t)R^{-1}(t), \quad (17)$$

где $P(t)$ – корреляционная матрица ошибок оценивания при

$$M[e(t)] = 0 \quad P(t) = M[e(t)e^T(t)].$$

Так как начальное значение матрицы $P(t)$:

$$P(t_0) = M \left\{ [z(t_0) - \bar{z}_0][z(t_0) - \bar{z}_0]^T \right\} \quad \text{и} \quad z(t_0) = x_0, \quad x(t_0) = z_0 \quad \text{то согласно (16):}$$

$$P(t_0) = P_0. \quad (18)$$

Корреляционная матрица ошибок является решением матричного дифференциального уравнения Риккати [5]:

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) = & A(t)P(t) + P(t)A^T(t) - \\ & - P(t)H^T(t)R^{-1}(t)H(t)P(t) + \\ & + B(t)Q(t)C^T(t), \end{aligned}$$

которое следует решать при начальных условиях (18). При шлифовании изделий для каждого конкретного режима матрицы A , B , C и H являются постоянными.

Предположим, что $Q = M[W(t)W^T(\tau)]$ и $R = M[V(t)V^T(\tau)]$, описывающие статистические характеристики шумов, постоянны при обработке поверхности одной детали, тогда технологическая система, определяемая уравнениями (8), является стационарной (рис. 1).

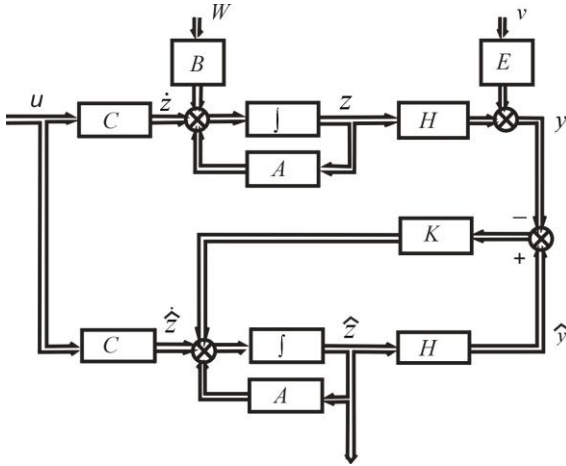


Рис. 1. Структурная схема стационарной системы с фильтром Калмана

Для такой системы уравнение фильтра Калмана-Бьюси принимает вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{z}}_1 \\ \dot{\hat{z}}_2 \\ \dot{\hat{z}}_3 \\ \dot{\hat{z}}_4 \\ \dot{\hat{\psi}}_1 \\ \dot{\hat{\psi}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \gamma_4 & 0 \\ \alpha_4 & \alpha_4 & \alpha_4 & \alpha_4 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \\ \hat{z}_3 \\ \hat{z}_4 \\ \hat{\psi}_1 \\ \hat{\psi}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times S + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} \times \left(y - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \\ \hat{z}_3 \\ \hat{z}_4 \\ \hat{\psi}_1 \\ \hat{\psi}_2 \end{bmatrix} \right)$$

Тогда матрица коэффициентов усиления фильтра оказывается постоянной и определяется выражением

$$\hat{K} = \hat{P} \hat{H} R^{-1},$$

где $\hat{P}$ – положительно определенная матрица, являющаяся решением алгебраического матричного уравнения Риккати:

$$\begin{aligned} & \hat{P} \times \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \gamma_4 & 0 \\ \alpha_4 & \alpha_4 & \alpha_4 & \alpha_4 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix} + \\ & + \hat{P} \times \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & -\alpha_3 & \gamma_4 & 0 \\ \alpha_4 & \alpha_4 & \alpha_4 & \alpha_4 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix}^T - \\ & - \hat{P} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times R^{-1} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \times \hat{P} + \begin{bmatrix} \rho\gamma_1 & 0 \\ \rho\gamma_2 & 0 \\ \rho\gamma_3 & 0 \\ \rho\gamma_4 & 0 \\ 0 & kT_3 \\ 0 & -1 - kT_2T_3 \end{bmatrix} \times \end{aligned}$$

$$\times \begin{bmatrix} v_2 \\ W_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \rho\gamma_1 & 0 \\ \rho\gamma_2 & 0 \\ \rho\gamma_3 & 0 \\ \rho\gamma_4 & 0 \\ 0 & kT_3 \\ 0 & -1 - kT_2T_3 \end{bmatrix}^T = 0$$

Отсюда матрица $\hat{P}$ может быть получена как установившееся решение дифференциального уравнения

$$\dot{P} = AP + PA^T - PH^T R^{-1} HP + CQC^T,$$

$$\text{т.е. } P = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t).$$

Постоянство матрицы $\hat{K}$ позволяет достаточно просто реализовать семейство линейных программных фильтров с помощью ЭВМ.

Для построения фильтра Калмана-Бьюси разработана программа, позволяющая решать уравнения Риккати объекта и фильтра.

В качестве иллюстрации работы программы выполнен расчет коэффициентов фильтра Калмана-Бюсси для стационарного режима процесса шлифования шейки распределительного вала со следующими исходными данными: $m_1 = 150$, $m_2 = 15$, $c_1 = 1e7$, $c_2 = 1,5e7$, $c_3 = 1e7$, $h_1 = 2,1e4$, $h_2 = 1,3e4$, $h_3 = 1e4$, $D_v = 0,36 \cdot 10^{-12}$, $\alpha = -0.033$, $\beta = 2.93$. В результате выполнения программы получили численные данные, характеризующие качество работы фильтра (рис. 2 и 3).

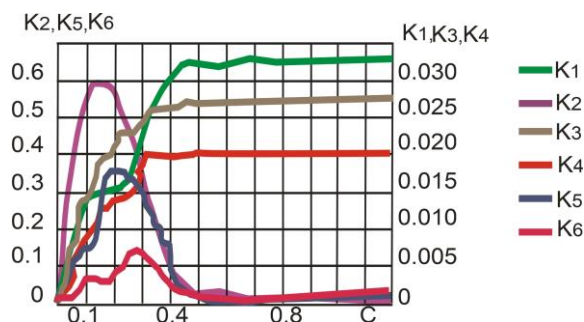


Рис.2. Зависимость коэффициентов усиления фильтра от времени

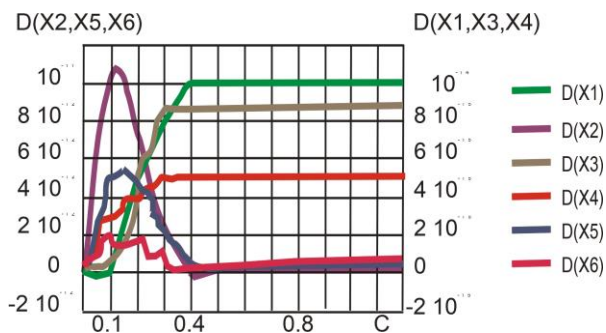


Рис.3. Зависимость дисперсии оценок от времени

Анализ результатов вычислений показывает, что установившееся состояние фильтра наступает через 0,4 с (что соответствует одному обороту детали). Это позволяет оценивать состояние системы в реальном масштабе времени, причем, даже в случае измерения лишь одной координаты фильтр дает оценки всех координат, а максимальные ошибки оценивания не превышают 10%.

Список литературы

- Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. — Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1979. — 232 с.

- Королев В.А. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / В.А. Королев. — Саратов: Изд-во Саратовского университета. 1975. — 192 с.
- Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Архипов П.В. Напряженно-деформированное состояние твердо-сплавных режущих элементов при алмазном затачивании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.
- Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. №1-2. С. 78-84.
- Деруссо П. Пространство состояний в теории управления / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. — М.: Наука, 1970. — 620 с.
- Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник / С.М. Братан, Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко. — М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. — 228 с.
- Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. — М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. — 154 с.
- Братан С.М. Синтез фильтра Калмана-Бюсси для оценивания состояния операции шлифования / С.М. Братан, Д.Е. Сидоров, В.Б. Богуцкий, // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. — Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015. — с. 87-91.
- Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314). — С.88-103.
- Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. — Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. — С. 36-40.
- Харченко А.О. Повышение точности процесса круглого шлифования путем эффективной виброизоляции станка / А. Харченко, С. Братан, Е. Владецкая // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». — Rzeszow — Przecław, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. — Р. 47-58.
- Харченко А.О. Реакция динамической системы на произвольный сигнал на примере станка в условиях плавучей мастерской / А. Харченко, Е. Владецкая, В.Долгин, С. Братан // Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Машины и

производственные процессы). – Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015. – С. 86-98.

13. Братан С.М. Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, // Научные технологии в машиностроении. – Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2016. №9 (63). – С. 10-15.
14. Владецкая Е.А. Моделирование вибрационных воздействий от внешних источников при шлифовании деталей в лабораторных условиях / Е.А. Владецкая // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2016. – Вып.4. – С.25-34.

References

1. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke (Dynamics of the formation of surfaces during abrasive processing) / YU.K. Novoselov. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo universiteta, 1979. – 232 s.
2. Korolev V.A. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke (Study of the processes of formation of the surfaces of the tool and parts during abrasive processing) / V.A. Korolev. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo universiteta. 1975. – 192 s.
3. Lobanov D.V., Ianiushkin A.S., Arkhipov P.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoyanie tverdospлавnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.
4. Lobanov D.V., Muliukhin N.V. Metodika prognozirovaniia povrezhdennosti tverdogo splava pri zatachivanii instrumenta dlia obrabotki nemetallicheskikh kompozitov // Aktual'nye problemy v mashinostroyenii. 2018. T. 5. №1-2. S. 78-84.1.
5. Derusso P. Prostranstvo sostoyaniy v teorii upravleniya / P. Derusso, R. Roy, CH. Klouz. – M.: Nauka, 1970. – 620 s.
6. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik / S.M. Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 228 s.
7. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2018. – 154 s.
8. Bratan S.M. Sintez fil'tra Kalmana-Byussi dlya otsenivaniya sostoyaniya operatsii shlifovaniya / S.M. Bratan, D.Ye. Sidorov, V.B. Bogutskiy, // Sovremennyye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii. – Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2015. – S. 87-91.
9. Vladeckaya E.A. Obespecheniye kachestva shlifoval'noy obrabotki putem umen'sheniya vneshnih vozmushcheniy v usloviyakh plavuchey masterskoj / E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckiy // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314). – S.88-103.
10. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego fil'tra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchey remontnoy masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopribudobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36-40.
11. Harchenko A.O. Povysheniye tochnosti processa kruglogo shlifovaniya putem ehffektivnoy vibroizolyatsii stanka / A. Harchenko, S. Bratan, E. Vladeckaya // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». – Rzeszow – Przecław, Polska, 24-27 Wrzesnia, 2008. – P. 47-58.
12. Harchenko A.O. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyy signal na primere stanka v usloviyakh plavuchey masterskoj / A. Harchenko, E. Vladeckaya, V.Dolgin, S. Bratan // Monografiya «Maszyny i procesy produkcyjne» (Mashiny i proizvodstvennye processy). – Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015. – S. 86-98.
13. Bratan S.M. Issledovaniye nadezhnosti vibroizoliruyushchego ustroystva shlifoval'nogo stanka / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – Bryansk: FGBOU VO «BGTU», 2016. №9 (63). – S. 10-15.
14. Vladetskaya Ye.A. Modelirovaniye vibratsionnykh vozdeystviy ot vneshnikh istochnikov pri shlifovanii detaley v laboratornykh usloviyakh / Ye.A. Vladetskaya // Vestnik sovremennykh tekhnologiy: Sb. nauch. trudov. – Sevastopol': SevGU, 2016. – Vyp.4. – S.25-34.

УДК 621.7

ИСТОРИЧЕСКАЯ РЕТРОСПЕКТИВА И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ

П.А. Новиков¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Впервые о винтовой поверхности упоминается в изобретениях, сделанных представителями древней Греции. Азиатские исследователи также отмечают наличие данной технологии в древнем Китае. Большое конструкторское распространение резьба получила в Средневековье. Однако, до XIX века технология обработки резьб относилась лишь к внешней резьбе, и лишь с изобретением токарного станка становится возможным изготовление внутренних резьб. Сравнение современных конструкций инструмента и технологий обработки с появившимися в XIX веке привело к предложению новых способов формирования внутренней резьбовой поверхности. Предложенные технологии могут выступить в качестве фундамента для улучшения, оптимизации и получения перспективных видов обработки.

Ключевые слова: история, технологии, внутренняя резьба, перспективные технологии.

HISTORICAL RETROSPECTIVE AND NEW TECHNOLOGIES FOR FORMING INNER THREADS

P.A. Novikov¹¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

For the first time, the screw surface is mentioned in inventions made by representatives of ancient Greece. Asian researchers also note the presence of this technology in ancient China. The great design distribution of carving has received in the Middle Ages. However, until the XIX century, the technology of thread processing referred only to the external thread, and only with the invention of the lathe it is possible to produce internal threads. Comparison of modern tool constructions and machining technologies with those that appeared in the XIX century led to the proposal of new ways of forming the internal threaded surface. The proposed technologies can serve as a basis for improvement, optimization and obtaining promising types of processing.

Keywords: history, technology, internal threads, promising technologies.

Первые упоминания о резьбе как конструкторском элементе оставил греческий философ, математик и механик Архит Тарентский (IV-V в.в. до н. э.) [1, 2, 4], поэтому в европейской литературе он считается основоположником и изобретателем резьбы. Позднее, Архимед (III-II в.в. до н.э.) [2, 3, 4] более широко развил и применил винтовые поверхности и винт для перемещения жидкостей и сыпучих тел.

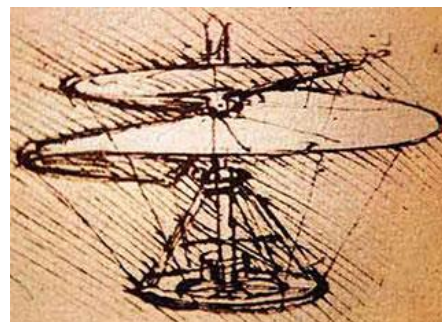
Необходимо отметить, что в один ряд с греческой колыбелью появления резьбы, восточноазиатские ученые ставят и древнюю китайскую технологическую школу, однако какие-либо письменные упоминания о резьбе в этом регионе относятся лишь к 12 веку

н.э., т.е. к моменту появления европейцев (монахов-иезуитов) на территории Китая [4].

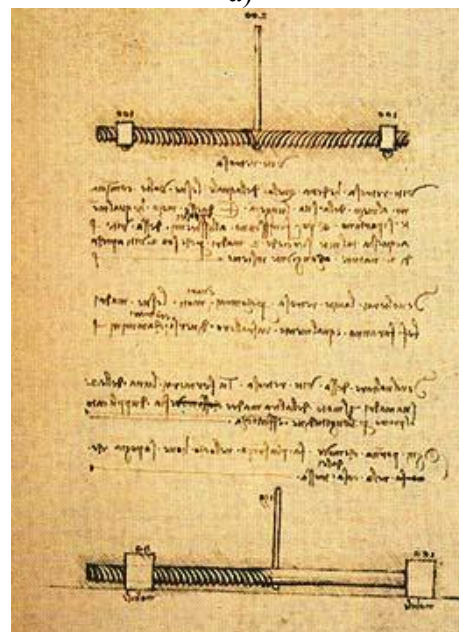
В Средневековье резьбу стали применять в качестве крепежного элемента. На поверхность заготовки наносилась винтовая траектория будущей резьбы, затем мастерской, слесарным инструментом (зубилом и молотком, напильником и т.п.) формировал внешнюю резьбу [5, 6]. В зависимости от конструкционного материала – дерево или металл – закрепления винта осуществлялось путем установки клина в отверстие винта, в деревянных заготовках, или простым развальцовыванием соответствующего торца, при использовании металла в качестве материала заготовки. Речь об изготовлении внут-

ренных резьб не велась – не существовало соответствующих инструментов. В крайней необходимости гайка заменялась конструкцией из втулки с радиально установленными в ней штифтами, выполняющими роль витков внутренней резьбы. Наиболее известным представителем Средневековья, широко использующим в своих научных и практических работах винтовую поверхность и резьбу, является Леонардо Да Винчи. Например, применение винтовых поверхностей можно увидеть в его фантастических изобретениях летательного аппарата (рис. 1, а) и в конструкции винта «Retrosa» (рис. 1, б), оснащенного левой и правой резьбой и нашедшего применение в современной технологической оснастке, медицинских приспособлениях и различных приборах (токарный двухкулачковый патрон, тиски, хирургический расширитель, циркуль-измеритель и т.п.).

История современной резьбы начинается только в XIX веке. Проблема отсутствия массового применения резьб заключалась в сложной и трудоемкой технологии получения последней и отсутствии каких-либо стандартов ее изготовления – требовалась механизация процесса производства. В 1800 году английский изобретатель Генри Модсли разработал и реализовал первый промышленный металлорежущий станок [7]. С его помощью были изготовлены первые «копиры» – винтовые элементы, выступающие в кинематической цепи в качестве синхронизаторов вращения заготовки и перемещения резца. Это позволило внедрить концепцию взаимозаменяемости: Г. Модсли для использования в своей мастерской изготовил наборы метчиков и плашек, таким образом, любой болт соответствующего размера подходил к любой гайке того же размера. Это было большим шагом вперед в техническом прогрессе и производстве оборудования.



а)



б)

Рис. 1. Изобретения Леонардо Да Винчи:
а) конструкция летательного аппарата;
б) винт «Retrosa»

Процесс формирования внутренней резьбы метчиками Г. Модсли состоял в следующем[8]: в подготовленное отверстие заданного диаметра врезался инструмент – метчик, при этом ему сообщалось вращательное и поступательное движения, причем поступательное движение жестко связано с вращательным, что реализовалось конструкцией инструмента. Резьба формировалась за счет срезания зубьями заборного участка инструмента материала заготовки во впадине контура резьбы. Т.е. впервые использована, сейчас уже ставшая классической, схема обработки резьбового отверстия метчиком.

Изобретения Г. Модсли дали мощный импульс развития промышленного оборудования и оснастки. К сожалению, не удалось найти изображения метчиков, предложен-

ных самым новатором, однако был обнаружен инструмент, разработанный его современниками. В лондонском Музее науки представлены конструкции метчиков, разработанные Р. Бодмером. Патентование конструкции метчиков датировано 1841 г. Общий вид станда и метчики представлены на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Демонстрационный стенд истории обработки резьб лондонского Музея науки:

а) общий вид станда; б) метчики Р. Бодмера (патент 1841 г).

С момента создания первых метчиков в их конструкцию и технологию изготовления были внесены значительные изменения: применение винтовых стружечных канавок; выполнение затылования на рабочих зубьях; применение шлифования для обработки рабочих поверхностей; нанесение покрытий, повышающих стойкость инструмента и т.п. Пример разнообразия технических решений можно увидеть в конструкции поперечного сечения деформирующих метчиков, работающих по методу выдавливания резьбы, а не вырезания (рис. 3). Фактическая геометрия участков вершин поперечного сечения инструмента оказывает существенное влияние на процесс резьбовыдавливания [9].

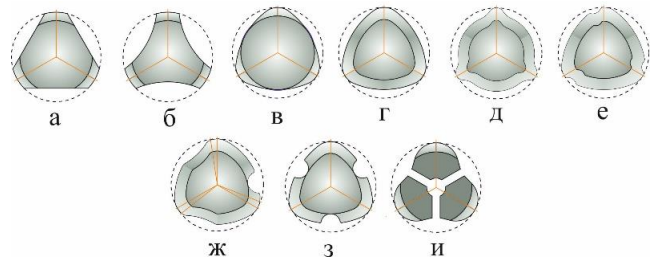


Рис. 3. Формы поперечных сечений деформирующих метчиков:

а, б, в – симметричные с полным профилем резьбы только на рабочих выступах; г, д, е – симметричные с полным профилем резьбы по всему периметру; ж – несимметричные с полным профилем резьбы по всему периметру и одной канавкой для смазки; з – симметричные с полным профилем резьбы по всему периметру и тремя канавками для смазки; и – симметричные с полным профилем резьбы на рабочих выступах и центральным отверстием для смазки

Для царской России и Советского Союза метчики явились заимствованным инструментом и технологией.

Однако, советские и российские исследователи внесли огромный вклад в изучение природы процесса внутренней резьбообработки и оптимизации конструкций инструмента. Вопросам исследования закономерностей процесса образования внутренних резьбовых поверхностей посвящены работы ведущих ученых В.В. Матвеева, В.И. Шагуна, А.А. Грудова, Ю.Л. Фрумина, О.С. Андрейчикова, А.Е. Стешкова, В.М. Меньшкова, Г.П. Урлапова, В.С. Середы, А.Н. Резникова, А.И. Бояруноса, В.М. Эпштейна, В.Г. Якухина, Ф.Н. Канареева, А.О. Харченко и многих других.

На рис. 4 изображен режущий метчик одного из мировых лидеров производства резьбообразующего инструмента – немецкой компании «Guhring» [10].



Рис. 4. Режущий метчик компании Guhring

Сравнение конструкций (рис. 4) и используемой современными метчиками технологии формирования внутренней резьбы с конструкцией (рис. 2, б) и технологией при-

меняемой на заре механизации резьбообработки дает однозначный вывод – базовая основа осталась неизменной. Таким образом, более 200 лет данная технология является единственно массово применяемым методом получения внутренней резьбы.

Целью статьи является историческая ретроспектива технологий резьбообработки и предложение новых технологий формирования внутренней резьбовой поверхности.

Формообразование внутренней резьбы путем сваривания профилированной заготовки с поверхностью отверстия.

Суть способа состоит в следующем: между профилированной и пространственно ориентированной заготовкой и поверхностью отверстия формируются межатомные связи, что приводит к получению внутренней резьбовой поверхности.

В качестве заготовки может быть использована проволока, подвергнутая профилированию в зависимости от вида получаемой резьбы. Профилирование осуществляется любым из известных способов обработки металлов давлением (прокат, волочение, прессование и т.п.). На рис. 5, а) представлена заготовка-проволока с поперечным сечением в виде равнобедренной трапеции с углом при вершине 60° для формирования метрической резьбы. На рис. 5, б) та же проволока-заготовка, но уже ориентированная в пространстве, т.е. завитая по требуемой винтовой направляющей.

Для формирования межатомных связей предлагается применять сварку. Из имеющихся способов за основу взята сварка трением.

Практически данный способ предполагается реализовать следующим образом: на полую оправку 1 (рис. 6), снабженную винтовой канавкой соответствующего профиля, навивают проволоку-заготовку 2. Затем, оправка 1 с навитой проволокой-заготовкой 2 вводится в заранее подготовленное цилиндрическое отверстие.

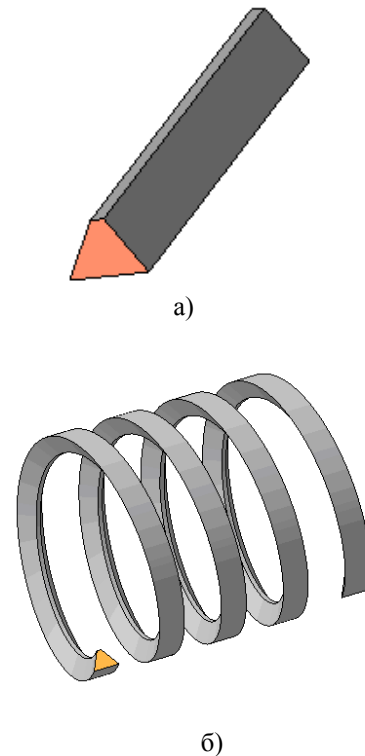


Рис. 5. Проволока заготовка:
а) профиль заготовки; б) завитая по спирали проволока-заготовка

Причем, внешний диаметр навитой проволоки-заготовки 2 должен быть незначительно меньше отверстия, в которое помещают оправку 1. Оправка 1 в своей конструкции имеет радиальные пазы 3, что дает возможность упругого перемежения лепестков 4. После установки оправки 1 в отверстие, на лепестки 4 воздействуют при помощи, например, тарельчатых пружин 5, установленных на штоке 6, радиальной силой. За счет чего лепестки 4 деформируются и компенсируют зазор, существующий между поверхностями проволоки-заготовки 2 и отверстия.

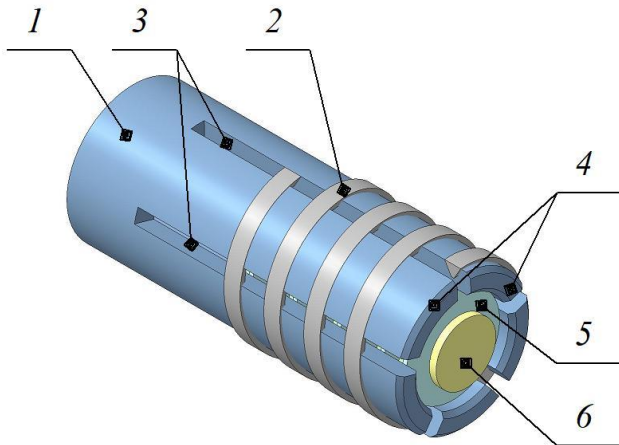


Рис. 6. Инструмент для сваривания резьбы в отверстии

Оправке 1, находящейся в отверстии, сообщают ультразвуковые колебания, действие которых направлено вдоль оси. Вместе с оправкой 1 в движение приходит и проволока-заготовка 2. Контакт поверхностей проволоки-заготовки и отверстия и действие ультразвуковых колебаний вызывают выделение тепла с последующим расплавлением металла в зоне контакта. Процесс протекает очень быстро. Далее, осуществляется резкая остановка оправки 1, незначительная выдержка, в процессе которой образуются межатомные связи и происходит охлаждения сварного соединения. В оправке 1 разжимаются тарельчатые пружины 5 – снимается воздействие радиальных сил на лепестки 4. Оправка 1 вывинчивается из отверстия по образованной резьбовой поверхности.

Для предотвращения перегрева проволоки-заготовки в лепестках 4 оправки могут быть выполнены каналы для пропускания охлаждающей жидкости. Ребра винтовой канавки, расположенные на торцах лепестков 4 со стороны пазов оправки 1, могут выполнять роль лезвий и удалять слой материала – наплыва – образованного в процессе сварки.

Данный способ достаточно легко автоматизируется и может быть применен в крупносерийном и массовом производстве при не высоких требованиях к точности резьбовых поверхностей.

Формообразование внутренней резьбы путем «выжигания» в неподготовленной заготовке.

Суть способа состоит в следующем: формирование в неподготовленной электропроводной заготовке резьбового отверстия путем воздействия периодических электрических разрядов через электрод-метчик.

Основой данного способа, с одной стороны, служит электроэрозионная обработка, при которой осуществляется выжигание элементарных объемов металла заготовки за счет периодического действия электрических разрядов. С другой, специализированный инструмент, в качестве которого выступает электрод-метчик. Определение «неподготовленная заготовка» предполагает отсутствие отверстия, необходимого, например, при получении резьбы метчиком.

Конструкция электрода-метчика приведена на рисунке 7. Он состоит из прошивочной части 1, копирной части 2 и хвостовика 3. Между частью 1 и 2 выполнена технологическая канавка. Прошивочная часть 1 представляет собой усеченный конус, сужающейся к телу инструмента. Копирная часть 2 представляет собой резьбу, выполненную на цилиндрической поверхности. Резьба имеет нестандартные размеры, например, размеры профиля должны быть уменьшены на величину искрового зазора. Хвостовик 3 реализован в виде цилиндра, может иметь в своей конструкции дополнительные лыски или пазы для удержания и дополнительной ориентации инструмента в процессе работы.

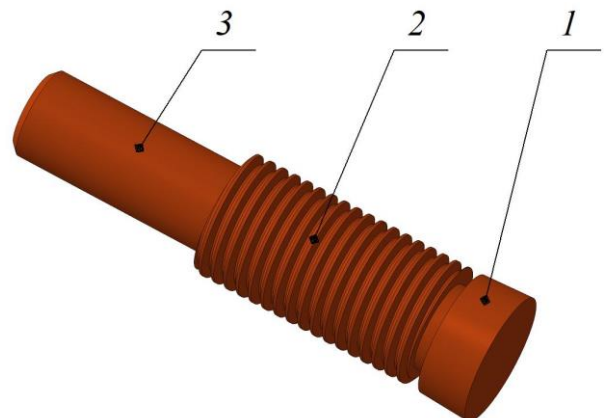


Рис. 7. Электрод-метчик

Диаметр свободного торца прошивочной части 1 выполняется в размер 0,8-0,9 от внутреннего диаметра формируемой резьбы. Внешний диаметр резьбы на копирной части 2 соответствует размеру прошивочной части 1 на меньшем торце.

При обработке реализуется следующий алгоритм действий:

- электрод-метчик подводят к поверхности обрабатываемой заготовки, в которой отсутствует отверстие;
- сопрягают окружность свободного торца прошивочной части 1 с точкой будущего внутреннего диаметра резьбы, с учетом искрового зазора;
- подают рабочий ток на инструмент и осуществляют электроэрозионную прошивку на заданную глубину отверстия – при этом работают элементы прошивочной части 1;
- производят рабочую подачу электрода-метчика в радиальном направлении на высоту профиля резьбы;
- осуществляют обкатку инструмента по планетарной траектории внешнего диаметра резьбы, при этом инструмент совершает «попутное» вращение и перемещение в осевом направлении, необходимое для образования резьбовой поверхности – здесь, как и на предыдущем шаге, в работе участвует и копирная часть 2;
- по завершению полной обработки ток снимают, электрод-метчик отводят в центр и выводят из отверстия.

Данный способ применим в индивидуальном или опытном производстве, при обработке деталей из труднообрабатываемых электропроводных материалов или металлов с неизвестными свойствами. Реализация указанного способа с применением электрода-метчика происходит на электроэрозионных станках с ЧПУ.

Формообразование внутренней резьбы выдавливанием, при отсутствии вращения инструмента или заготовки в процессе обработки.

Суть способа: формирование пластическим деформированием резьбовой поверхно-

сти, при перемещении рабочих элементов лишь в одной плоскости.

Способ во многом напоминает классическую обработку внутренней резьбы деформирующим метчиком. Однако, к недостаткам обработки внутренней резьбы с использованием метчиков-раскатников относят большие крутящие моменты и интенсивный износ рабочих элементов. Предлагаемый способ лишен этих недостатков.

Инструмент для обработки указанным способом представлен на рисунке 8. Он состоит из корпуса 1, подвижного пуансона 2 и сжимающей пружины 3. Корпус 1 снабжен несколькими упругими пресс-элементами 4, с выполненной на них резьбовой поверхностью. Пресс-элементы 4 могут располагаться, как показано на рис. 7, напротив друг друга или должны быть равномерно распределены по окружности – с целью компенсации испытываемой нагрузки. Резьба на разных пресс-элементах 4 корпуса 1 должна иметь одну образующую и один профиль.

Подвижный пуансон 2 имеет возможность перемещаться вдоль оси корпуса 1 на заданное расстояние. На одном из торцов подвижного пуансона 2 выполнено несколько цилиндрических ступеней, имеющих ответную геометрию с обратной стороны пресс-элементов 4.

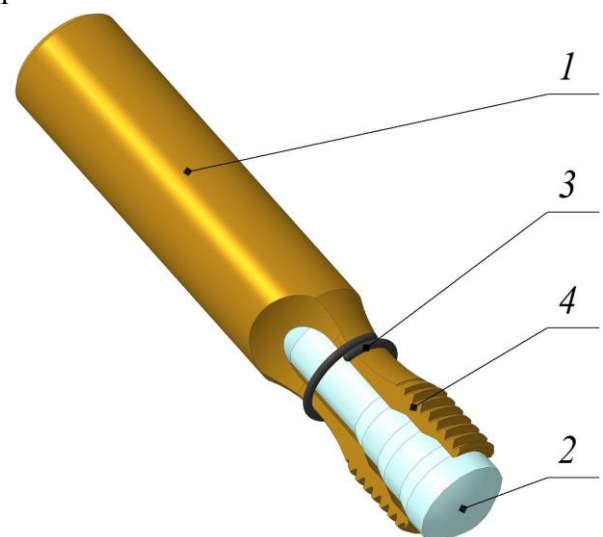


Рис 8. Инструмент для выдавливания резьбы

Упругий элемент 3 представляет собой кольцо, основной задачей которой является упругое деформирование к оси корпуса 1

пресс-элементов 4. Однако, пресс-элементы 4 могут иметь заранее заданное смещение к оси, искусственно выполненное в ходе термической обработки изделия.

Работа инструмента состоит из следующих этапов:

- инструмент вводится в заранее подготовленное отверстие, диаметр которого равен размеру для раскатки резьб, на требуемую глубину. Подвижный пуансон 2 находится в положении обеспечивающим максимальное сближение пресс-элементов 4 – т.е. смещен в крайнее правое положение;
- подвижный пуансон 2 возвращается в корпус 1, наличие цилиндрических ступеней на пуансоне приводит к появлению радиальной нагрузки, воздействующей на пресс-элементы 4 и приводящих к их перемещению. Смещение пресс-элементов 4 приводит к их вдавливанию в материал отверстия, и копированию части резьбы на поверхности отверстия;
- подвижный пуансон 2 смещается в крайнее правое положение, тем самым снимается нагрузка с пресс-элементов 4, под действием упругого элемента 3 они занимают первоначальное положение;
- инструмент проворачивается на угол незначительно меньший сектора рабочего воздействия пресс-элементов 4, при этом обеспечивается и его осевое перемещение, для обеспечения угла подъема резьбы;
- цикл выдавливания резьбы и перемещения инструмента повторяется до момента получения резьбы по всей площади отверстия.

Предложенный способ может быть применен при обработке материалов, обладающих повышенной пластичностью: легких металлов и сплавов, медных и латунных сплавов, цинка и цинковых сплавов, бронзы, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, титана и его сплавов, а также конструкционных, легированных и инструментальных сталей с пределом прочности до 500 МПа.

По производительности способ уступает классической обработки метчиками, однако более надежен, а инструмент обладает большим ресурсом работы рабочих элементов.

Предложенные новые способы обработки внутренних резьб дают материал для дальнейшего инженерного творчества, оптимизации и улучшения имеющихся наработок.

Список литературы

1. Carl A. Huffman. Archytas of Tarentum. Pythagorean, Philosopher and Mathematician King/ Carl A. Huffman. – Cambridge University Press, 2005. – 665.
2. Information on Screw Threads. Historical Background [Электронный ресурс]// Bolt Science. URL: <http://www.boltscience.com/pages/screw2.htm> (Дата обращения: 24.07.2019).
3. The history of the screw [Электронный ресурс] // Компания WAGNER® tooling systems. URL: <http://www.wagner-werkzeug.de/fileadmin/pdf/Geschichte-Schraube-ENG.pdf> (Дата обращения: 24.07.2019).
4. Randall C. Brooks. Origins, Usage And Production Of Screws: An Historical Perspective/ Randall C. Brooks.// History and Technology, 1990, Vol. 8.1 – pp. 51-76.
5. Куропаткина О.В. Технические и исторические аспекты процесса развития резьбы/О.В. Куропаткина, Е.С. Федорова// Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, 2016, №12-1. – С. 121–126.
6. Сви́дерская К. С. Из истории развития резьбы. 3D моделирование резьбы/К.С. Сви́дерская, В.В. Ечеистов // Молодежный научно-технический вестник (электронный журнал), 2014, №03 (<http://ainsnt.ru/doc/716313.html>).
7. Загорский Ф.Н. Генри Модсли / Ф.Н. Загорский, И.М. Загорская. – М: Наука, 1981. – 144с.
8. Industrial Biography [Электронный ресурс] // Samuel Smiles. URL: <http://public-library.uk/ebooks/48/93.pdf> (Дата обращения: 24.07.2019).
9. Повышение точности формообразования мелко-размерных резьб метчиками в алюминиевых сплавах/ С.М. Братан [и др.]. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
10. Инструмент для обработки резьб [Электронный ресурс] // Фирма GÜHRING. URL: www.guhring.ru/download.php?file=/uploads/cat/files/Catalog_Threading_Tools_RU_Russia_lowres2.pdf (Дата обращения: 11.07.2019).

References

1. Carl A. Huffman. Archytas of Tarentum. Pythagorean, Philosopher and Mathematician King/ Carl A. Huffman. – Cambridge University Press, 2005. – 665.
2. Information on Screw Threads. Historical Background [Jelektronnyj resurs]// Bolt Science. URL: <http://www.boltscience.com/pages/screw2.htm> (Data obrashhenija: 24.07.2019).
3. The history of the screw [Jelektronnyj resurs] // Kompanija WAGNER® tooling systems. URL: <http://www.wagner-werkzeug.de/fileadmin/pdf/Geschichte-Schraube-ENG.pdf> (Data obrashhenija: 24.07.2019).
4. Randall S. Brooks. Origins, Usage And Production Of Screws: An Historical Perspective/ Randall C. Brooks// History and Technology, 1990, Vol. 8.1 – pp. 51-76.
5. Kuropatkina O.V. Tehnicheskie i istoricheskie aspekty processa razvitija rez'by/O.V. Kuropatkina, E.S. Fedorova// Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk, 2016, №12-1. – S. 121–126.
6. Sviderskaja K. S. Iz istorii razvitija rez'by. 3D modelirovanie rez'by/K.S. Sviderskaja, V.V. Echeistov // Molodezhnyj nauchno-tehnicheskij vestnik (jelektronnyj zhurnal), 2014, №03 (<http://ainsnt.ru/doc/716313.html>).
7. Zagorskij F.N. Genri Modslj / F.N. Zagorskij, I.M. Zagorskaja. – M: Nauka, 1981. – 144s.
8. Industrial Biography [Jelektronnyj resurs] // Samuel Smiles. URL: <http://public-library.uk/ebooks/48/93.pdf> (Data obrashhenija: 24.07.2019).
9. Povyshenie tochnosti formoobrazovanija melkorazmernih rez'b metchikami v aljuminievyh splavah/ S.M. Bratan [i dr.]. – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2017. – 164 s.
10. Instrument dlja obrabotki rez'b [Jelektronnyj resurs] // Firma GÜHRING. URL: www.guhring.ru/download.php?file=/uploads/cat/files/Catalog_Threading_Tools_RU_Russia_lowres2.pdf (Data obrashhenija: 11.07.2019).

УДК 621.757

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ВИДОВ УПЛОТНЕНИЙ ДЛЯ СИЛОВЫХ ГИДРОЦИЛИНДРОВ

А.Ю. Тараховский¹, А.А.Тараховский¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Силовые гидроцилиндры нашли широкое применение в промышленности, например, в строительном дорожном, землеройном, подъёмно-транспортных машинах, в авиации и космонавтике, а также в технологическом оборудовании металлорежущих станках, кузнечно-прессовых машинах. Однако в технической литературе и каталогах производителей уплотнений информация о возможных видах и материале уплотнений представлена разрозненно и противоречива. На основе доступной информации о современных силовых гидроцилиндрах, видах и материалах применяемых уплотнений был проведен анализ основных видов уплотнений для силовых гидроцилиндров, рассмотрены возможные конструкции уплотнений силовых гидроцилиндров, определены материалы для изготовления поршневых и штоковых уплотнений, и представлены свойства материала уплотнений. Проведенные исследования позволили определить Достоинства и недостатки видов уплотнений силовых гидроцилиндров. Результаты исследования расширяют знания о современных конструкциях и видах уплотнений силовых гидроцилиндров, а также применяемом материале для их изготовления.

Ключевые слова: силовой гидроцилиндр, уплотнение поршня, уплотнение штока, манжетное уплотнение, резиновое уплотнительное кольцо, защитное кольцо, материал уплотнения.

ANALYSIS OF THE MAIN TYPES OF SEALS FOR POWER CYLINDERS

A.Yu. Tarakhovskiy¹, A.A. Tarakhovskiy¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

Power hydraulic cylinders are widely used in industry, for example, in construction and road, earthmoving, lifting and transport machines, in aviation and Astronautics, as well as in technological equipment of metal-cutting machines, forging and press machines. However, in the technical literature and catalogues of seal manufacturers information about the possible types and material of seals is presented separately and contradictory. On the basis of available information about modern power hydraulic cylinders, types and materials of seals used, the analysis of the main types of seals for power hydraulic cylinders was carried out, possible designs of seals of power hydraulic cylinders were considered, materials for the manufacture of piston and rod seals were determined, and the properties of the material of seals were presented. The conducted studies allowed to determine the Advantages and disadvantages of types of seals of power cylinders. The results of the study expand knowledge of modern designs and types of seals power cylinders, as well as the material used for their manufacture.

Keywords: power cylinder, piston seal, stem seal, lip seal, rubber o-ring, guard ring, seal material.

Силовые гидроцилиндры нашли широкое применение в промышленности, например, в строительном дорожном, землеройном, подъёмно-транспортных машинах, в авиации и космонавтике, а также в технологическом оборудовании - металлорежущих станках, кузнечно-прессовых машинах. При малых габаритах конструкции гидроцилиндры позволяют развивать значительные усилия

при перемещении объектов в разных плоскостях [1, 2].

Целью статьи является – выполнить анализ основных видов уплотнений для силовых гидроцилиндров.

Особенности, свойственные силовым гидроцилиндрам можно представить в виде списка [3 – 6]:

1. Гидроцилиндр (рис. 1) способен функционировать как гидродвигатель и как гидронасос.

2. Высокая герметичность устройства.
3. КПД, близкий к 100%.
4. Плавность хода штока.
5. Низкий уровень шума.
6. Продолжительный срок эксплуатации.
7. Высокая эксплуатационная надежность.

Все эти особенности обеспечиваются за счет уплотнений, как поршня [7, 9-11], так и штока.

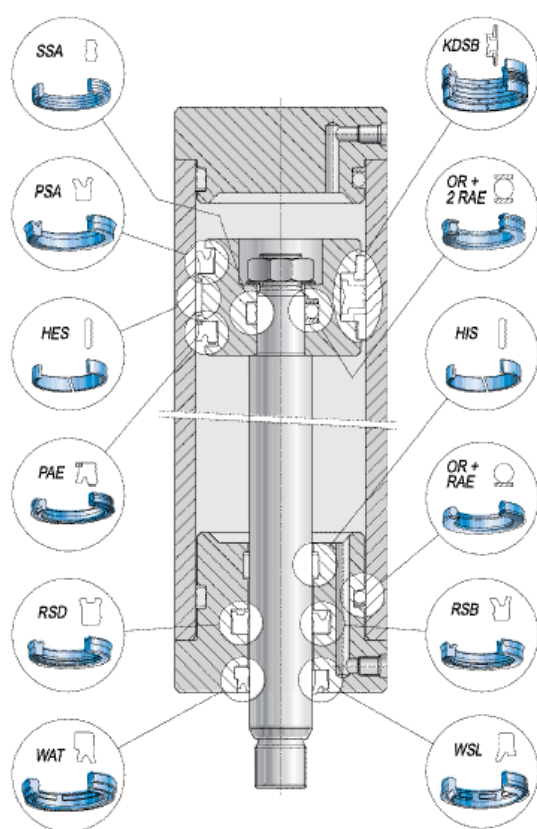


Рис. 1. Гидроцилиндр

Уплотнение поршня гидроцилиндра является многосоставным изделием [8]. Минимально его структура содержит всего лишь два элемента: внутреннее уплотнительное кольцо и внешнее защитное кольцо. В целом же число данных элементов в структуре может достигать до пяти. Например, добавляется центральное многокромочное резиновое уплотнение, для удержания статического давления. Также добавляются

защитные кольца. В зависимости от конструкции гидроцилиндра для уплотнения поршня могут применяться следующие виды изделий:

1. Уплотнение поршня с асимметричным профилем.
2. Уплотнение поршня с асимметричным профилем и кольцом против выдавливания.
3. Уплотнение поршня с асимметричным профилем и направляющим кольцом.
4. Уплотнение поршня двухстороннего действия.
5. Уплотнение поршня двухстороннего действия с кольцами против выдавливания.
6. Уплотнение поршня двухстороннего действия с кольцами против выдавливания и направляющими кольцами.
7. Уплотнение поршня, усиленное пружиной.

Исходя из эксплуатационных условий гидроцилиндра, а также его конструкции, в качестве материала для изготовления поршневых уплотнений могут применяться следующие вещества [12]:

1. Полиуретан PU.
2. Политетрафторэтилен PTFE.
3. Нитрил-бутадиеновый каучук NBR.
4. Термопластичная полиэфирная смола TPE.

Свойства материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства материалов для изготовления грязеъемников для гидроцилиндров

Свойства	Материал изготовления грязеъемников для гидроцилиндров			
	PU	PTFE + бронза	PTFE + карбон	TPE
Температура	от -45° до +100°C	По схеме*	от -40° до +100°C	от -45° до +140°C
Скорость	≤ 0,5 м/с	≤ 15 м/с	≤ 0,2 м/с	≤ 1 м/с
Давление	≤ 400 бар	≤ 600 бар	≤ 300 бар	≤ 500 бар

Схема температурных режимов представлена в таблице 2.

Таблица 1.Схема температурных режимов для резинотехнических компонентов

Резина NBR	Резина FKM	Резина VMQ
-30°C +130°C	-30°C +200°C	-60°C +200°C

Уплотнение штока гидроцилиндра по своей структуре так же является многосоставным [8, 13]. В стандартном виде оно содержит всего два элемента. Первый — динамический, предназначен для обеспечения низкого трения и обеспечения эксплуатации на больших скоростях. Данный элемент изготавливают из материала, совместимого со многими рабочими средами. Второй элемент – кольцо круглого сечения – статический, обеспечивает герметичность. Исходя из конструкции гидроцилиндра для уплотнения штока, применяют следующие виды изделий:

1. Полукомпактное уплотнение штока.
2. Полукомпактное уплотнение штока с дополнительной уплотнительной кромкой.
3. Полукомпактное уплотнение штока с дополнительной уплотнительной кромкой и с кольцом против выдавливания.
4. Полукомпактное уплотнение штока с дополнительной уплотнительной кромкой, с кольцом против выдавливания и с усиливающим элементом.
5. Уплотнение штока с асимметричным профилем.
6. Уплотнение штока с асимметричным профилем и дополнительной уплотнительной кромкой.
7. Уплотнение штока с асимметричным профилем, с дополнительной уплотнительной кромкой и с кольцом против выдавливания.
8. Одностороннее уплотнение штока.
9. Компактное уплотнение штока одностороннего действия с кольцом против выдавливания и эластичным уплотнительным элементом.
10. Уплотнение штока, усиленное пружиной.
11. Двухстороннее уплотнение штока.

Исходя из эксплуатационных условий работы гидроцилиндра и типа конструкции, в качестве материала для изготовления што-

ковых уплотнений могут использовать следующие вещества:

1. Полиуретан PU.
2. Политетрафторэтилен PTFE.
3. Нитрил-бутадиеновый каучук NBR.
4. Термопластичная полиэфирная смола TPE.

Свойства материалов представлены в таблице 3.

Таблица 2.Свойства материала для изготовления грязесъемников для гидроцилиндров

Свойства	Материал изготовления грязесъемников для гидроцилиндров			
	PU	PTFE + бронза	PTFE + карбон	TPE
Температура	от -45° до +100°C	По схеме*	от -200° до +200°C	от -40° до +100°C
Скорость	≤ 0,5 м/с	≤ 15 м/с	≤ 15 м/с	≤ 0,5 м/с
Давление	≤ 700 бар	≤ 600 бар	≤ 300 бар	≤ 500 бар

Схема температурных режимов для резинотехнических компонентов представлена в таблице 4.

Таблица 3. Схема температурных режимов для резинотехнических компонентов

Резина NBR	Резина FKM	Резина VMQ
-30°C +130°C	-30°C +200°C	-60°C +200°C

Опорно-направляющие кольца используют как заменитель стандартных направляющих из бронзы. Эти изделия способны обеспечивать прямолинейное движение штока, предотвращая контакт металла штока с металлом на крышке гидроцилиндра (опорно-направляющие кольца штока) либо же контакт металла поршня и гильзы (опорно-направляющие кольца поршня) в момент воздействия нагрузок радиального типа перпендикулярно направления их движения. По типу конструкции, опорно-направляющие кольца имеют следующее предназначение:

1. Штоковое опорно-направляющее кольцо.
2. L-образное штоковое опорно-направляющее кольцо.
3. Т-образное штоковое опорно-направляющее кольцо.
4. Поршневое опорно-направляющее кольцо.

5. Опорно-направляющее кольцо штока и поршня.

6. Опорно-направляющее кольцо плунжерного гидроцилиндра.

Исходя из эксплуатационных условий работы гидроцилиндра и типа его конструкции, могут быть использованы следующие материалы для изготовления опорно-направляющих колец:

1. Фторопласт.
2. Полиамид.
3. Армированная ткань.

Свойства материалов представлены в таблице 5.

Таблица 4. Свойства материала для изготовления грязесъемников для гидроцилиндров

	Фторопласт	Арамидная ткань	Полиамид
Температура	От -40°C до +200°C	От -40°C до +120°C	От -40°C до +100°C
Скорость	≤ 5 м/с	≤ 1 м/с	≤ 1 м/с
Нагрузка	≤ 15 Н/мм ² при 20°	≤ 50 Н/мм ² при 120°	≤ 30 Н/мм ² при 100°

Гидравлические манжеты применяют для уплотнения зазоров между цилиндром и штоком, либо цилиндром и штоком, либо цилиндром и плунжером в различных типах гидравлических механизмов, которые функционируют за счет возвратно-поступательных движений. При этом гидравлические манжеты могут иметь разные конструкционные типы исполнения, которые задействуют в зависимости от рабочего давления, рабочей температуры, а также их скорости перемещения [14-16]. Кроме того, гидравлические манжеты группируют по следующим стандартам:

1. Уплотнения шевронные резинотканевые ГОСТ 22704-77 [17].
2. Манжеты уплотнительные резиновые для гидравлических устройств ГОСТ 14896-84 [18].

В системах, где требуется высокий уровень износостойкости, для замены резиновых манжет используют манжеты из полиуретана. Таким образом, материалом изготовления может быть:

1. Резинотехническая основа.
2. Резинотканевая основа.
3. Полиуретановая основа.

Свойства материала для изготовления гидравлических манжет представлены в таблице 6.

Таблица 5. Свойства материала для изготовления гидравлических манжет

	Резинотехнические	Полиуретановые	Резиновые
Температура	От -50°C до +100°C	От -60°C до +120°C	По схеме
Давление	≤ 63 МПа	≤ 105 МПа	

Схема температурных режимов для резинотехнических компонентов представлена в таблице 7.

Таблица 6. Схема температурных режимов для резинотехнических компонентов

	Резина NBR	Резина FKM	Резина VMQ
Температура	-30°C +130°C	-30°C +200°C	-60°C +200°C
Давление для типа 1	От 0,1 до 50 МПа		
Давление для типа 2	От 1,0 до 50 МПа		

Резиновые уплотнительные кольца используются в гидроцилиндрах для предотвращения вероятности протекания рабочей среды [19]. Кроме того, они позволяют уплотнить имеющиеся в устройстве зазоры между штоком и крышкой цилиндра, или поршнем и крышкой цилиндра. Примечательно, что резиновые уплотнительные кольца могут работать как в соединениях статичного типа, так и в подвижных соединениях, например, при возвратно-поступательном движении. По типу сечений резиновые уплотнительные кольца разделяют на следующие [20, 21].

1. Резиновые уплотнительные кольца круглого сечения.
2. Резиновые уплотнительные кольца прямоугольного сечения.
3. Резиновые уплотнительные кольца х-образного типа сечения.

Исходя из условий эксплуатации гидроцилиндра, в частности, диапазона рабочих температур и рабочей среды, резиновые уплотнительные кольца делают из следующих материалов:

1. Нитрил-бутадиеновый каучук.
2. Фтористый каучук.
3. Силиконовый каучук.

Свойства материала для изготовления резиновых уплотнительных колец представлены в таблице 8.

Таблица 7. Свойства материала для изготовления резиновых уплотнительных колец

Резина NBR	Резина FKM	Резина VMQ
-30°C +130°C	-30°C +200°C	-60°C +200°C

Манжетные уплотнения - тип уплотнений, достаточно широко представленный в технике. Основной нишей, в которой применяются манжетные уплотнения, являются уплотнения подвижных элементов (валы, штоки) машин и оборудования. Наиболее часто манжетные уплотнения применяют для герметизации штоков гидроцилиндров (возвратно-поступательное движение) и вращающихся валов машин (вращательное движение). Задачей манжетных уплотнений является разделение сред, защита внутренних частей машин и оборудования от попадания загрязнений, защита подвижных элементов от износа. Для выполнения этих задач применяются также другие типы уплотнений, такие как сальниковые набивки и торцовые уплотнения.

Герметизация в манжетном уплотнении достигается за счёт плотного прилегания эластичного материала манжеты к подвижному (шток или вал) и неподвижному (корпус) элементу механизма. Плотное прилегание может обеспечиваться за счёт наличия упругих элементов (пружин, армирующих элементов), упругих свойств материала уплотнения, а также благодаря конструкции уплотнения за счёт давления рабочей среды.

В связи с тем, что в зоне контакта манжета – подвижный элемент происходит износ материала уплотнения, применение манжетных уплотнений является экономически оправданным в узлах, где легко заменить вышедшие из строя элементы [22].

Классификация манжетных уплотнений

По характеру нагрузки:

- для вращающихся валов (большая скорость вращения);

- для штоков и направляющих (осевые перемещения с небольшой скоростью).
- По потребительским характеристикам:
- универсальные уплотнения;
- манжетные уплотнения с улучшенными характеристиками;
- уплотнения для специальных условий.

По назначению:

- для уплотнения валов;
- для уплотнения поршней;
- для уплотнения штоков;
- грязесъемники;
- пыльники.

По направлению воздействия рабочей среды:

- одностороннего действия;
- двухстороннего действия.

В связи с особенностями конструкции, основным материалом для изготовления манжетных уплотнений является резина. Наиболее часто применяются композиции на основе бутадиен-нитрильного каучука (БНК, NBR), фторкаучука (СКФ, FKM, FPM), бутил-каучука (IIR, изобутиленизопреновый каучук), гидрированного бутадиен-нитрильного каучука (HNBR). Резина может дополнительно армироваться углеродным, полимерным, стеклянным волокном или тканью. Для придания дополнительной герметизирующей способности применяют плоские или витые пружины из пружинной или нержавеющей стали. Для изготовления манжетных уплотнений со специальными характеристиками используют, фторопласт (ПТФЕ), полиуретан, полиамид, полиформальдегид и другие материалы.

Достоинства и недостатки манжетных уплотнений представлены в таблице 9.

Таблица 8. Достоинства и недостатки манжетных уплотнений

Достоинства	Недостатки
Низкая стоимость	Высокий износ в зоне контакта с подвижным элементом, и как следствие необходимость периодической замены.
Хорошая уплотняющая способность	По мере износа снижается уплотняющая способность, что может привести к потере герметичности
Простота конструкции	Органический спектр материалов для изготовления манжетных уплотнений, и как следствие ограничения по температурному диапазону эксплуатации, рабочим давлением и средам.
Малые габариты и вес	

Список литературы

- Схиртладзе, А.Г. Гидравлические и пневматические системы. — Издание 2-е, дополненное. / А.Г. Схиртладзе, В.И. Иванов, В.Н. Кареев М.: ИЦ МГТУ «Станкин», «Янус-К», 2003. — 544 с.
- Тараховский, А.А. Типизация базовых деталей уплотнительных соединений (эластичная кольцевая деталь - канавка отверстия) / А.А. Тараховский, А.Ю. Тараховский // Механика XXI века. - 2017. - № 16. - С. 189-194.
- Буренин, В.В. Новые конструкции силовых гидроцилиндров строительных и дорожных машин / В.В. Буренин // Строительные и дорожные машины. - 2015. - № 6. - С. 25-29.
- Кондаков Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др.; Под общ. ред. А. И. Голубева, Л.А. Кондакова. - М.: Машиностроение, 1986. — 464 с., ил.
- Лепешкин, А. В. Гидравлика и гидропневмопривод: Учебник, ч. 2. Гидравлические машины и гидропневмопривод / А.В. Лепешкин, А. А. Михайлин, А. А. Шейпак; под ред. А. А. Шейпака. — М.: МГИУ, 2003. — 352 с.
- Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. — 2-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1982
- 06.23-19У.44П Уплотнения поршня гидроцилиндра РЖ 19У. Технология полимерных материалов (Резина. Лакокрасочные материалы и органические покрытия. Вспомогательные материалы для производства полимеров и изделий из них). - 2006. № 23.
- Sealing mechanism and failure analysis of actuator reciprocating seal / Y. Zhang [et al.] // Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Hefei, 2016. P. 2190–2195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603952>
- Burenin V. V. New seals for the moving joint of hydraulic power cylinders // Russian Engineering Research. 2011. T. 31, № 10. С. 1036–1038. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X11100042>
- Буренин В. В. Новые конструкции уплотнений для подвижных соединений силовых гидроцилиндров объемного гидропривода строительных машин и механизмов // Механизация строительства. 2012. № 1. С. 10–14.
- Flitney R. Seals and sealing handbook: 6th edition. Butterworth-Heinemann, 2014. 633 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03302-9>
- Durability of a polymer composite material and service life of packing elements of contact movable sealing devices / O. A. Mamaev [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2008. Vol. 29, Issue 2. P. 127–132. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366608020086>.
- Топоров А.В. Анализ конструкций контактных уплотнений / А.В. Топоров // NovaInfo.Ru. - 2016. - Т. 2, № 54. - С. 55-57.
- Журавлева С.Н. Исследование механизма утечки через манжетный герметизатор вращающегося вала / С.Н. Журавлева // Новые материалы и технологии в машиностроении. - 2017. № 26. - С. 22-26.
- Буренин В.В. Новые манжетные уплотнения для вращающихся валов гидрофицированных машин и механизмов / В.В. Буренин // Механизация строительства. - 2010. № 11 (797). - С. 13-16.
- Буренин В.В. Новые конструкции манжетных уплотнений для подвижных соединений силовых гидроцилиндров / В.В. Буренин // СТН. - 2011. № 7. - С. 38-40.
- ГОСТ 22704-77 Уплотнения шевронные резиноканавчатые для гидравлических устройств. Технические условия (с Изменениями N 1, 2, 3). М.: Изд-во стандартов, 1985. -47с.
- ГОСТ 14896-84 Манжеты уплотнительные резиновые для гидравлических устройств/ Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2003. -54 с.
- Столярук, Д.В. Анализ факторов, влияющих на качество сборки уплотнительных соединений с резиновыми уплотнительными кольцами круглого сечения / Д.В. Столярук, А.Ю. Тараховский // Актуальные проблемы метрологического обеспечения научно-практической деятельности. II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. - 2018. - С. 315-319.
- ГОСТ 9883-73. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств. Конструкция и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1985. -59с.
- ГОСТ 15180-86 Прокладки плоские эластичные. Основные параметры и размеры М.: Изд-во стандартов, 1993. - 14с.
- Buyalich G.D. Comparative analysis of the lip seal in hydraulic power cylinder / G.D. Buyalich, K.G.

Buyalich // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - T. 770. P. 402-406.

References

1. Skhirtladze, A.G. Gidravlicheskie i pnevmaticheskie sistemy. – Izdanie 2-e, dopolnennoe. / A.G. Skhirtladze, V.I. Ivanov, V.N. Kareev M.: ITs MGTU «Stankin», «Janus-K», 2003. – 544 s.
2. Tarakhovskiy, A.A. Tipizatsiya bazovykh detalей uplotnitel'nykh soedinenii (elastichnaya kol'tsevaia detal' - kanavka otverstii) / A.A. Tarakhovskii, A.Iu. Tarakhovskii // Mekhanika XXI veku. - 2017. - № 16. - S. 189-194.
3. Burenin, V.V. Novye konstruktzii silovykh gidrotsilindrov stroitel'nykh i dorozhnykh mashin / V.V. Burenin // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. - 2015. - № 6. - S. 25-29.
4. Kondakov L.A. Uplotneniia i uplotnitel'naia tekhnika: Spravochnik / L.A. Kondakov, A.I. Golubev, V.B. Ovander i dr.; Pod obshch. red. A. I. Golubeva, L.A. Kondakova. - M.: Mashinostroenie, 1986.-464 s., il.
5. Lepeshkin, A. V. Gidravlika i gidro-pnevmoprivod: Uchebnik, ch. 2. Gidravlicheskie mashiny i gidropnevmoprivod / A.V. Lepeshkin, A. A. Mikhailin, A. A. Sheipak; pod red. A. A. Sheipaka. – M.: MGIU, 2003. – 352 s.
6. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody: Uchebnik dlia mashinostroitel'nykh vuzov/ T. M. Bashta, S. S. Rudnev, B. B. Nekrasov i dr. – 2-e izd., pererab. – M.: Mashinostroenie, 1982.
7. 06.23-19U.44P Uplotneniia porshnia gidrotsilindra RZh 19U. Tekhnologiya polimernykh materialov (Rezina. Lakokrasochnye materialy i organicheskie pokrytiia. Vspomogatel'nye materialy dlia proizvodstva polimerov i izdelii iz nikh). 2006. № 23.
8. Sealing mechanism and failure analysis of actuator reciprocating seal / Y. Zhang [et al.] // Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Hefei, 2016. P. 2190–2195. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603952>
9. Burenin V. V. New seals for the moving joint of hydraulic power cylinders // Russian Engineering Research. 2011. T. 31, № 10. C. 1036 –1038. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X11100042>.
10. Burenin V. V. Novye konstruktzii uplotnenii dlia podvizhnykh soedinenii silovykh gidrotsilindrov ob"emnogo gidroprivoda stroitel'nykh mashin i mekhanizmov // Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2012. № 1. S. 10 –14.
11. Flitney R. Seals and sealing handbook: 6th edition. Butterworth–Heinemann, 2014. 633 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03302-9>
12. Durability of a polymer composite material and service life of packing elements of contact movable sealing devices / O. A. Mamaev [et al.] // Journal of Friction and Wear. 2008. Vol. 29, Issue 2. P. 127 – 132. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366608020086>.
13. Toporov A.V. Analiz konstruktzii kontakt-nykh uplotnenii / A.V. Toporov // NovaInfo.Ru. 2016. T. 2, № 54. S. 55-57.
14. Zhuravleva S.N. Issledovanie mekhanizma utechki cherez manzhetnyi germetizator vrashchaiushchego-sia vala / S.N. Zhuravleva // Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii. 2017. № 26. S. 22-26.
15. Burenin V.V. Novye manzhetnye uplotneniia dlia vrashchaiushchikhsia valov gidrofitsirovannykh mashin i mekhanizmov / V.V. Burenin // Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2010. № 11 (797). S. 13-16.
16. Burenin V.V. Novye konstruktzii manzhet-nykh uplotnenii dlia podvizhnykh soedinenii silo-vykh gidrotsilindrov / V.V. Burenin // STIN. 2011. № 7. S. 38-40.
17. GOST 22704-77 Uplotneniia shevronnye re-zinotkaneyevye dlia gidravlicheskiykh ustroystv. Tekhnicheskie usloviia (s izmeneniyami N 1, 2, 3). M.: Izd-vo standartov, 1985. 47s.
18. GOST 14896-84 Manzhetnye uplotnitel'nye rezinovyie dlia gidravlicheskiykh ustroystv/ Tekhnicheskie usloviia. M.: Izd-vo standartov, 2003. 54s.
19. Stoliaruk, D.V. Analiz faktorov, vliyayushchikh na kachestvo sborki uplotnitel'nykh soedinenii s rezinovymi uplotnitel'nymi kol'tsami kruglogo secheniia / D.V. Stoliaruk, A.Iu. Tarakhovskiy // Aktual'nye problemy metrologicheskogo obespecheniia nauchno-prakticheskoi deiatel'nostimaterialy II Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. 2018. S. 315-319.
20. GOST 9883-73. Kol'tsa rezinovyie uplotnitel'nye kruglogo secheniia dlia gidravlicheskiykh i pnevmaticheskikh ustroystv. Konstruktziia i razmery. M.: Izd-vo standartov, 1985. -59s.
21. GOST 15180-86 Prokladki ploskie elasticheskiye. Osnovnye parametry i razmery M.: Izd-vo standartov, 1993. 14s.
22. Buyalich G.D. Comparative analysis of the lip seal in hydraulic power cylinder / G.D. Buyalich, K.G. Buyalich // Applied Mechanics and Materials. - 2015. - T. 770. P. 402-406.

УДК 621.923

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ВИБРАЦИЯМИ

Е.А. Левченко¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты детального анализа разработанного математического аппарата для создания технологии обработки деталей с вибрациями. Приведена оценка параметра технологической функциональности рабочей среды; определено время жизни вихресточа; дана аналитическая оценка поверхностной плотности массы первой компоненты; проведено вычисление тензоров первой и второй вязкости рабочей среды; вычислены основные технологические параметры обработки деталей с вибрациями – технологическое время обработки τ_{req} и глубина съема материала h_{req} .

Ключевые слова: обработка деталей с вибрациями; рабочая среда, технологические параметры.

RESEARCH OF DEPENDENCE OF DYNAMIC AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE PROCESS OF PROCESSING PART PARTS WITH VIBRATIONS

Е.А. Levchenko¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The results of a detailed analysis of the developed mathematical apparatus for creating a technology for processing parts with vibrations are presented. The estimation of the parameter of the technological functionality of the working environment is given; the lifetime of the whirlwind is determined; an analytical assessment of the surface density of the mass of the first component is given; the tensors of the first and second viscosity of the working medium are calculated; The basic technological parameters of processing parts with vibrations are calculated - the technological processing time and the depth of material removal.

Keywords: processing of parts with vibrations; working environment, technological parameters.

Многие ученые, работающие в области обработки деталей с применением вибраций, в своих работах [1–5] отмечают, что эффективность этого процесса, т.е. его качество и производительность, определяется не только механико-физико-технологическими параметрами рабочей среды, самого технологического оборудования, но и особенностями механизма вибровозбуждения. Общие принципы построения теории использования обработки деталей с применением вибраций позволяют рассматривать процесс не в от-

дельных его проявлениях, а комплексно, учитывая, что все динамические параметры этого процесса непосредственно или опосредованно определяются свойствами внешнего поля возбуждения. Следует отметить, что в современной теории обработки деталей с применением вибрационного поля связь между полевой сеткой виброполя и выбором технологического оборудования практически не исследована, хотя, очевидно, что она существенно влияет на технологию обработки деталей. Этот, и другие актуальные вопросы теории обработки деталей с

применением вибраций, имеющие технологическую перспективу, составляют предмет исследования в данной статье [6-8].

Характер динамических и технологических процессов прежде всего зависит от параметров контактной задачи «рабочая среда – обрабатываемая деталь». Скорости первой $\dot{V}_{1e}(N, t)$ и второй $\dot{W}_{2e}(N, t)$ компоненты двухкомпонентной рабочей среды имеют вид

$$\dot{V}_{1ei}(N, t) = \int_0^t \iint_{R^2} \varepsilon_{ik}^{(1)}(N - P, t - \tau) \times \times F_{S.p.k}(P, \tau) d\tau d\sigma_p, \quad (1)$$

$$\dot{W}_{2ei}(N, t) = \int_0^t \iint_{R^2} \varepsilon_{ik}^{(2)}(N - P, t - \tau) \times \times F_{S.p.k}(P, \tau) d\tau d\sigma_p, \quad (2)$$

где двухвалентные тензоры $\varepsilon_{ik}^{(1)}(N, t)$, $\varepsilon_{ik}^{(2)}(N, t)$ представляют собой коэффициенты первой и второй вязкости; $N = N(x, y)$, $d\sigma_p = dx dy$, а $\dot{F}_{S.p.}(N, t)$ – соленоидально-потенциальная составляющая внешнего динамического поля возбуждения $\dot{F}(N, t)$.

$$\dot{F}(N, t) = \dot{F}_{S.p.}(N, t) + \dot{F}_{r.d.}(N, t), \quad (3)$$

где $\dot{F}_{r.d.}(N, t)$ – случайное векторное поле, вызывающее вихреобразование в рабочей среде [9].

Для массы вихресток имеет равенство

$$\begin{aligned} m_{2e}(t) &= m_{2e}(0) - \lambda \int_0^t E(\tau) d\tau = \\ &= \pi m_a n_a \bar{r}^2(0) - \\ &- \lambda \int_0^t \int_0^{2\pi} m_{1e}(\tau) \bar{r}(\tau) n_{1e}(N, \tau) \left| \dot{F}_{r.d.}(N, \tau) \right| d\tau d\varphi, \\ \bar{r}(t) &= \sigma(t) \sqrt{\frac{\pi}{2}}. \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнении (4) величины $m_{1e}(t)$ и $n_{1e}(N, t)$ определяются соотношениями

$$m_{1e}(t) = m_a \exp \left\{ -\alpha \int_0^t n_{1e}(\tau) d\tau \right\}, \quad (5)$$

$$n_{1e}(N, t) = n_a \exp \left\{ \alpha' \int_0^t n_{2e}(\tau) \left| \dot{V}_{1e}(N, t) - \dot{W}_{2e}(N, \tau) \right| d\tau - \alpha'' t \right\}$$

где $\alpha, \alpha', \alpha''$ обозначают некоторые, пока неизвестные, неотрицательные коэффициенты, а $n_{1e}(t)$ имеет вид

$$\begin{aligned} n_{1e}(t) &= \langle n_{1e}(N, t) \rangle = \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{\mu(s)} \iint_S n_{1e}(N, t) d\sigma_N. \end{aligned} \quad (6)$$

Масса $\Delta M(t)$, теряемая телом Σ (рис. 1) на промежутке времени $[0, t]$ в процессе виброобработки определяется формулой (7)

$$\begin{aligned} \Delta M(t) &= \chi_1 \int_0^t d\tau \int_L dlm_{1e}(\tau) n_{1e}(N, \tau) \left| \dot{V}_{1e}(N, \tau) - \dot{u}(N, \tau), \dot{n}(N, \tau) \right| + \\ &+ \chi_2 \int_0^t d\tau \int_L dlm_{2e}(\tau) n_{2e}(N, \tau) \left| \dot{W}_{2e}(N, \tau) - \dot{u}(N, \tau), \dot{n}(N, \tau) \right|, \end{aligned}$$

где χ_1, χ_2 – коэффициенты съема материала.

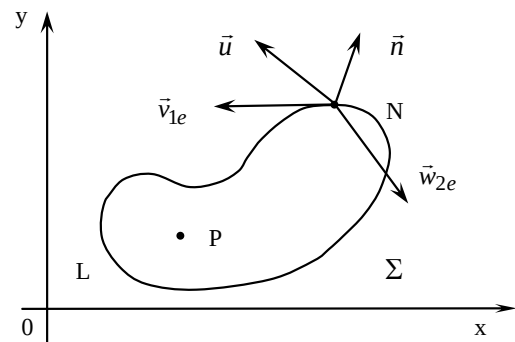


Рис.1. Схема контакта рабочей среды с обрабатываемым телом Σ в точке N

Для циркуляции $E(t)$ точечного вихря в (6) имеем [10]:

$$E(t) = m_{1e}(t) \bar{r}(t) \int_0^{2\pi} n_{1e}(N, t) K(N, t) \left| \dot{F}_{r.d.}(N, t) \right| d\varphi$$

И, наконец, плотность потока массы $\dot{\pi}_e(N, t)$, дается формулой

$$\begin{aligned} \dot{\pi}_e(N, t) &= m_{1e}(t) n_{1e}(N, t) \dot{V}_{1e}(N, t) + \\ &+ m_{2e}(t) n_{2e}(N, t) \dot{W}_{2e}(N, t) \end{aligned} \quad (7)$$

Равенства (1) – (7) представляют собой математический аппарат, описывающий движение рабочей среды в присутствии плоско-параллельного виброполя и ее контакт с обрабатываемой деталью. Проблема, которая будет исследована, заключается в следующем: дать детальный анализ математического аппарата с точки зрения создания технологии процесса обработки деталей с применением вибраций [11]. В этом плане необходимо рассмотреть такие вопросы:

- асимптотическая оценка величин $\sigma(t)$ и $\bar{r}(t)$;
- оценка параметра T технологической функциональности рабочей среды;
- определение времени жизни вихресточа $t_{r.d.}$;
- асимптотическая оценка поверхностной плотности массы первой компоненты $\rho_{1e}(N, t) = m_{1e}(t)n_{1e}(N, t)$ при $t \rightarrow \infty$
- вычисление тензоров первой и второй вязкости $\varepsilon_{ik}^{(1)}(N, t)$ и $\varepsilon_{ik}^{(2)}(N, t)$;
- вычисление основных технологических параметров виброобработки: технологического времени обработки τ_{teq} и глубины съема материала h_{teq} ;

1. Асимптотическая оценка величин $\sigma(t)$ и $\bar{r}(t)$. Параметры $\sigma(t)$ и $\bar{r}(t)$ связаны соотношением из [4]:

$$\bar{r}(t) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma(t). \quad (8)$$

Учитывая (8) и структуру закона легко определить,

$$\lim_{t \rightarrow +0} \sigma(t) = \sigma(0) > 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma(t) = 0. \quad (9)$$

В дальнейшем будем полагать, что некоторая величина $A(N, t)$ общей теории обработки с применением вибраций рассматривается в модели с выполненным динамическим предельным переходом (в ДПП-модели), если вместо $A(N, t)$ используется ее динамический предел $A(t)$

$$A(t) = \langle A(N, t) \rangle = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{\mu(s)} \iint_s A(N, t) d\sigma_N. \quad (10)$$

Перейдем от плотности числа вихресточков $n_{2e}(N, t)$ к ее динамическому пределу $n_{2e}(t)$. Для определенности предположим, что величина $n_{2e}(t)$ представляет собой процесс Пуассона, т.е. вероятность события $P(n_{2e}(t) = k)$ равна

$$P(n_{2e}(t) = k) = \frac{(\xi t)^k}{k!} e^{-\xi t}, \quad k = 0, 1, 2, \quad (11)$$

где ξ – интенсивность процесса Пуассона.

Имея в виду, что $\bar{r}(t)$ является средним радиусом вихресточка, на основании равенства (11) получим

$$n_{2e}(N, t) \approx n_{2e}(t) \approx \xi t \leq \frac{1}{\pi \bar{r}^2(t)} = \frac{2}{\sigma^2(t)}. \quad (12)$$

Из соотношения (12) следует асимптотическая оценка величины $\sigma(t)$

$$\sigma(t) \sim \sqrt{\frac{2}{\xi t}}, \quad t \rightarrow +\infty. \quad (13)$$

Учитывая соотношения (12) и (13), окончательно получим следующие оценки величин $\sigma(t)$ и $\bar{r}(t)$ на полупрямой $[0, \infty]$:

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{2}{\xi(a(t) + t)}}, \quad (13)$$

$$\bar{r}(t) = \sqrt{\frac{\pi}{\xi(a(t) + t)}}, \quad (14)$$

где $a(t)$ – некоторая монотонно возрастающая неотрицательная функция,

$$\lim_{t \rightarrow +0} a(t) = a(+0) = \frac{\xi \sigma^2(0)}{2}.$$

2. Оценка параметра T технологической функциональности рабочей среды. Параметр T удовлетворяет уравнению (10):

$$m_{1e}(T) = \beta m_a. \quad (15)$$

Используя (14) и уравнение (15), найдем

$$\exp \left\{ -\alpha \int_0^T n_{1e}(\tau) d\tau \right\} = \beta. \quad (16)$$

Интеграл в формуле (16) равен

$$\int_0^T n_{1e}(\tau) d\tau = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{\beta}. \quad (17)$$

В уравнении (17) функция $\eta_e(t)$ представляет собой динамический предел величины $\eta_e(N, t)$. Преобразуем интеграл в (17), используя теорему о среднем

$$\eta_e(\tau^*)T = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{\beta}, \quad \tau^* \in (0, T). \quad (18)$$

Так как $\eta_e(t) \geq n_a, t \geq 0$, то окончательно получим

$$T \leq \frac{1}{\alpha n_a} \ln \frac{1}{\beta}. \quad (19)$$

Выводы

В работе сформулирован прикладной аппарат оценок основных макропараметров теории обработки деталей с применением вибраций в присутствии внешнего переменного поля возбуждения. Приведена также конкретная аналитическая схема, в соответствии с которой могут быть определены теоретико-технологические характеристики виброполя по заданным линиям уровня функции тока $g = g(u, v)$. В связи с этим большой теоретический и практический интерес представляет решение обратной задачи теории обработки деталей с применением вибраций, что является целью дальнейших исследований.

Список литературы

1. Левченко Е.А. Использование механохимического метода обработки сталей на вибрационных станках / Е.А. Левченко, Ю.В. Дейкун // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. Севастопольский государственный университет. – Севастополь: Изд-во ФГАОУ ВО СевГУ, 2018. – Вып. № 4. – С. 44 – 48.
2. E. Levchenko Investigation of Thermal Processes in Abrasive Pipe Samplin/ E. Levchenko, N. Pokintelitsa, MATEC Web of Conferences, vol. 129, 01078 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901082>.
3. Левченко Е.А., Покинтелица Н.И., Харченко А.О. Теория и практика абразивной резки труб: монография – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 142 с. ISBN:9785955805993.
4. E. Levchenko Theoretical Foundations of Vibration Processing Modeling / E. Levchenko, Yu. Deykun, Yu. Moroz Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018) 2018. – S. 1519-1526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_162.

5. E. Levchenko The study of dynamic characteristics during the vibration processing of parts, MATEC Web of Conferences 224, 01131 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401131>.
6. Мельникова Е.П. Обеспечение заданного качества поверхности при финишных методах обработки / Е.П. Мельникова // Вестник ДГТУ. – 2002. – Т. 2, № 4 (14). – С. 370 – 376.
7. Gillespie, LaRoux, Deburring and Edge Finishing Handbook, SME, Dearborn, MI, 1999.
8. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / [Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Гиллеспи Л. и др.]; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с.
9. Зубарев Ю.М. Современное оборудование, инструмент и технологии абразивной обработки заготовок / Ю.М. Зубарев, З.И. Кремень // Инструмент и технологии. – 2011. – № 3 (33). – С. 15 – 21.
10. Смоленцев Е.В. Классификация комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев // Вестник ДГТУ. – 2010. – Т. 10, № 1 (44). – С. 76 – 79.
11. Наладка и эксплуатация станков для вибрационной обработки / [Бабичев А.П., Рысева Т.Н., Самадуров В.А. и др.]; под ред. А.П. Бабичева. – М.: Машиностроение, 1988. – 64 с.

References

1. Levchenko E.A. Ispol'zovanie mekhanohimicheskogo metoda obrabotki stalej na vibracionnyh stankah / E.A. Levchenko, Yu.V. Dejgun // Vestnik sovremennyh tekhnologij: sb. nauch. tr. Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet. – Sevastopol: Izd-vo FGAOU VO SevGU, 2018. – Vyp. № 4. – С. 44 – 48.
2. E. Levchenko Investigation of Thermal Processes in Abrasive Pipe Samplin/ E. Levchenko, N. Pokintelitsa, MATEC Web of Conferences, vol. 129, 01078 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201712901082>.
3. Levchenko E.A., Pokintelica N.I., Harchenko A.O. Teoriya i praktika abrazivnoj razrezki trub: monografiya – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA-M, 2018. – 142 s. ISBN:9785955805993.
4. E. Levchenko Theoretical Foundations of Vibration Processing Modeling / E. Levchenko, Yu. Deykun, Yu. Moroz Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2018) 2018. – S. 1519-1526. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_162.
5. E. Levchenko The study of dynamic characteristics during the vibration processing of parts, MATEC Web of Conferences 224, 01131 (2018) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401131>.

-
6. Mel'nikova E.P. Obespechenie zadannogo kachestva poverhnosti pri finishnyh metodah obrabotki / E.P. Mel'nikova // Vestnik DGTU. – 2002. – Т. 2, № 4 (14). – S. 370 – 376.
 7. Gillespie, LaRoux, Deburring and Edge Finishing Handbook, SME, Dearborn, MI, 1999.
 8. Primenenie vibracionnyh tekhnologij na operacijah otdelochno-zachistnoj obrabotki detal'ej (ochistka, mojka, udalenie obloya i zausen-cev, obrabotka kromok) / [Babichev A.P., Mot-renko P.D., Gillespi L. i dr.]; pod red. A.P. Babicheva. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2010. – 289 s.
 9. Zubarev Yu.M. Sovremennoe oborudovanie, instrument i tekhnologii abrazivnoj obrabotki zagotovok / Yu.M. Zubarev, Z.I. Kremen' // Instrument i tekhnologii. – 2011. – № 3 (33). – S. 15 – 21.
 10. Smolencev E.V. Klassifikaciya kombinirovannyh metodov obrabotki / E.V. Smolencev // Vestnik DGTU. – 2010. – Т. 10, № 1 (44). – S. 76 – 79.
 11. Naladka i ekspluataciya stankov dlya vibracionnoj obrabotki / [Babichev A.P., Ryseva T.N., Samadurov V.A. i dr.]; pod red. A.P. Babicheva. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 64 s.

УДК 621.025

ШЛИФОВАНИЕ ТВЕРДОГО СПЛАВА И МИНЕРАЛОКЕРАМИКИ КОМБИНИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНЫМ МЕТОДОМ

Л.С. Секлетина¹, А.Р. Янюшкин¹, Н.В. Мулюхин¹¹ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация

Отмечены перспективы использования алмазных кругов на металлической связке и необходимость совершенствования существующих комбинированных технологий для повышения качественных и эксплуатационных характеристик при шлифовании. Показано перспективное направление эффективного использования методов комбинированной алмазной обработки с применением алмазного инструмента на металлической связке. Установлено, что использование комбинированных методов обработки различных материалов алмазными кругами на металлической связке, за счет непрерывной электрохимической правки, позволяет управлять процессом шлифования, тем самым повысить эффективность и рентабельность алмазного инструмента. Сделаны выводы и намечены следующие этапы исследований.

Ключевые слова: алмазное шлифование, комбинированная обработка, управление процессом правки, режимы, качество обработки.

GRINDING OF HARD ALLOY AND MINERAL CERAMICS USING COMBINED ELECTRO-DIAMOND METHOD

L.S. Sekletina¹, A.R. Yanyushkin¹, N.V. Muliukhin¹¹Federal State Educational Budget Institution of Higher Professional Education «The Ulianov Chuvash State University», Cheboksary, Russian Federation

Abstract

The prospects for the use of diamond wheels on a metal bond and the need to improve the existing combined technologies to improve the quality and performance during grinding are noted. A promising direction for the effective use of methods of combined diamond processing with the use of diamond tools on a metal bond is shown. It has been established that the use of combined methods for treating various materials with diamond circles on a metal bond, due to continuous electrochemical straightening, allows one to control the grinding process, thereby increasing the profitability of a diamond tool. Conclusions are drawn and the following stages of researches are planned.

Keywords: diamond grinding, combined processing, editing process control, modes, quality of processing.

Режущая керамика, как инструментальный материал, давно привлекает внимание исследователей ввиду высокой твердости, теплостойкости, износостойкости, доступности и недефицитности сырья для ее производства. Однако ее применение сдерживается относительно низкой прочностью металлокерамических пластин на изгиб, а также отсутствием жесткого, быстроходного и виброустойчивого оборудования.

Исследования в области материаловедения, совершенствование технологии изготовления позволили устранить недостатки керамики. В сочетании с успехами в станкостроении это обстоятельство выдвинуло

перспективу применения керамики в качестве инструментального материала на одно из ведущих мест.

В настоящее время широко применяются три группы марок режущей керамики: оксидная, смешанного типа и безоксидная.

Среди оксидной керамики на сегодня преобладают комбинации окиси Al_2O_3 + окиси Zr, для увеличения вязкости. Из отечественных керамических пластин при чистовой и получистовой обработке применяют марки ВО-13, ВО-16, ВШ-75, ЦМ-332.

Из отечественных керамических пластин смешанного типа наибольшее применение нашли марки ВОК-60, ВОК-63, ВОК-

71, ВСК-85С, ВЗ, ОНТ-20. Особой группой стоит режущая керамика безоксидного типа. К этой группе относится керамика на основе нитрида кремния Si_3N_4 . Все марки керамики обладают значительно более слабым, по сравнению с твердыми сплавами, адгезионным взаимодействием с обрабатываемым материалом.

Режущая керамика на основе нитрида кремния по сравнению с керамикой смешанного типа и оксидной менее чувствительна к тепловым колебаниям (ударам) и обладает большей прочностью на изгиб, но имеет меньшую твердость и прочность на сжатие, отличается высокой инертностью при повышенных температурах. Режущие пластины из этой керамики (отечественная керамика – силинит-Р), благодаря высокой прочности и нечувствительности к тепловым ударам, применяются при обработке в тяжелых условиях, например, по корке и с использованием технологических сред (СОЖ). Для обработки сталей эта керамика применения не нашла, но показала эффективность при обработке неметаллов, нелегированного серого чугуна, алюминия, никелевых и других сплавов.

Исследования показали, что из-за высокой твердости керамики абразивное изнашивание при резании возможно только при обработке закаленных сталей.

Это особенно важно для формирования режущей кромки инструмента при его шлифовании, затачивании и перетачивании, особенно с применением комбинированных электрофизических и электрохимических методов [1-5].

Характерной особенностью оксидно-карбидной керамики при точении закаленных сталей является то, что ее адгезионно-усталостное изнашивание сопровождается хрупким разрушением с отделением у режущей кромки по истечению определенного времени работы резца сравнительно крупных объемов керамического материала.

В настоящее время производство различных марок керамики освоено многими фирмами ФРГ (Feldmühle) Швеции, (Sandvik), Японии (Mitsubishi Metall Corporation), Великобритании (De Beer), США

(Ford) и другими промышленно развитыми странами. В России также выпускаются все виды перечисленных групп керамики.

Для обработки керамики нами предлагаются комбинированные электроалмазные методы шлифования в различных вариациях, при которых возможны различные сочетания работы электрических цепей.

Из предложенных вариантов наибольший интерес представляет работа электрической цепи, основанной на методе двойного травления [6] и дополнительно оснащенной электрической цепью катодного осаждения химических элементов из состава электролита на рабочие поверхности алмазного круга или обрабатываемого изделия [7-11] (рис.1).

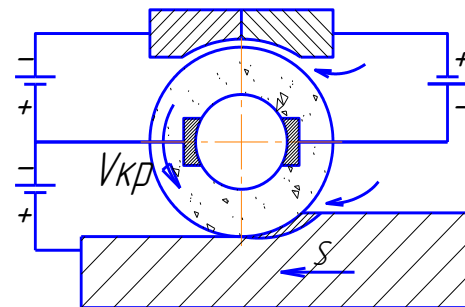


Рис.1. Схема комбинированного электроалмазного шлифования с дополнительным осаждением химических элементов на поверхности алмазного круга

Вид поверхности алмазного круга концентрации с наличием оксидной пленки показан на рис. 2.

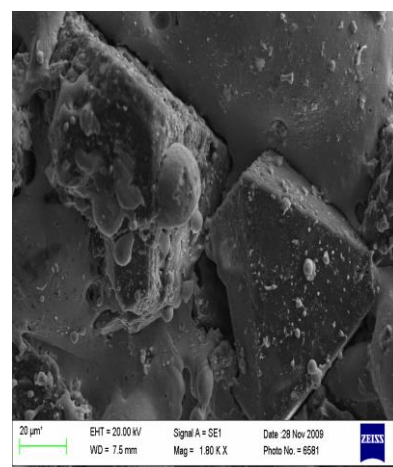


Рис.2. Поверхность алмазного круга AC6 80/63 M2-01 - 100 % с наличием оксидной пленки

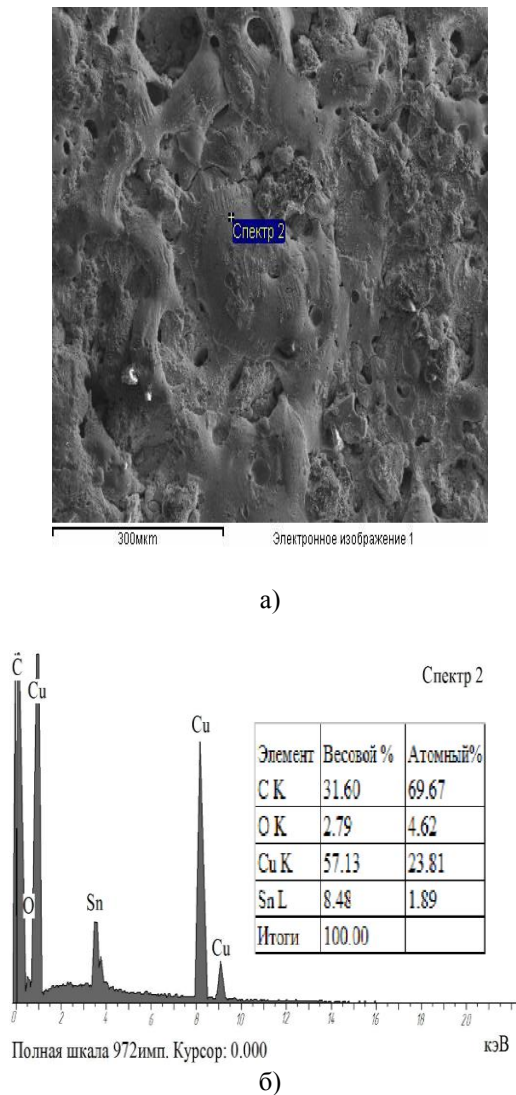


Рис.3. Спектральный анализ алмазного круга с наличием оксидной пленки

Спектральный анализ позволяет утверждать, что наиболее вероятным осаждением может быть пленка чистой меди или её соединений с другими химически активными элементами (рис. 3 а, б).

Образование пленок в каждый момент времени ограничены, поэтому они не нарушают структуры более глубоких слоев обрабатываемой поверхности изделий.

Расчеты энергии адгезии между элементами взаимодействующих поверхностей выполненные по методике, предложенной профессором А.С. Янющкиным представлены в таблице.

Таблица 1. Данные расчета энергии адгезии при шлифовании твердосплавного инструмента

Анод Катод	WC	TiC	Co	W	Ti
	$2W_p = 11,04$	$2W_p = 7,2$	$2W_p = 3,30$	$2W_p = 6,0$	$2W_p = 1,76$
Al $2W_p^{(Al)} = 1,13$	0,71 —	0,62 —	0,93 —	0,99 —	0,75 —
Cu $2W_p^{(Cu)} = 1,92$	1,00 —	0,89 —	1,20 —	1,29 —	0,97 —
Sn $2W_p^{(Sn)} = 0,77$	0,46 —	0,41 —	0,65 —	0,66 —	0,58 —
Zn $2W_p^{(Zn)} = 1,84$	1,09 —	0,96 —	1,26 —	1,42 —	0,97 —
Ni $2W_p^{(Ni)} = 3,36$	1,82 —	1,61 —	1,79 —	2,15 —	1,28 —
Si $2W_p^{(Si)} = 2,16$	1,09 —	0,98 —	1,29 —	1,40 —	1,05 —
Алмаз $2W_p^{(A)} = 14,4$	6,26 —	4,90 —	1,63 —	3,01 —	0,86 —
Fe $2W_p^{(Fe)} = 3,2$	2,08 —	1,79 —	1,74 —	2,31 —	1,13 —
Al₂O₃ $2W_p^{(Al_2O_3)} = 6,4$	3,07 —	2,78 —	2,71 —	3,34 —	1,91 —

(Знак — означает отсутствие процесса засаливания на поверхности алмазного круга).

Представленные расчеты энергии адгезии при взаимодействии связки алмазного круга с материалом твердосплавного инструмента подтвердили отсутствие физико-химического взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалами при комбинированном электроалмазном методе шлифования. В этих условиях алмазный круг, покрытый защитной пленкой, разделяет контактные поверхности, обладает лучшими режущими свойствами и гарантирует работу в режиме самозатачивания [12].

Таким образом рассмотренный механизм формирования и развития засаленного слоя на поверхности шлифовального круга позволил на различных этапах процесса шлифования влиять на его структурное со-

стояние, состав поверхностной пленки и повысить работоспособность алмазных кругов на металлических связках.

Полученные данные убедительно показывают, что при шлифовании и затачивании практически на любых режимах резания возникают высокие энергии, способствующие физико-химическим процессам и реакциям. Экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими положениями и одновременно подтверждают их и объясняют вклад атомно-молекулярных процессов в контактные явления, как засаливание, наростообразование, изнашивание режущего инструмента и формирование нового поверхностного слоя детали [12]. Результаты исследований позволяют не только глубже понять эти важнейшие процессы, что само по себе чрезвычайно ценно, но и создают научную базу для управления ими. Оптимизация фрикционных систем в этих условиях строится за счет правильного, научно обоснованного подбора контактирующих пар, учитывающего, прежде всего, химическую активность инструментальных материалов к конкретным обрабатываемым материалам и условиям работы режущих инструментов.

Существует также проблема, подлинно научная, разработка которой, совершенно немыслима без детального изучения контактных взаимодействий. Речь идет о проблеме создания высокоэффективных специальных смазочно-охлаждающих технологических средств и, прежде всего, жидкостей (СОЖ). То обстоятельство, что решение проблемы создания специальных составов СОЖ, с помощью которых можно не только влиять на контактные процессы, но и управлять ими, возможно только на научной основе, ни у кого не вызывает сомнений. Так же можно утверждать, что с помощью базовой СОЖ (воды, масла, синтетических растворов) можно доставить в зону контакта те или иные вещества, которые за счет высоких контактных энергий могут осуществить целенаправленные реакции и создать на контактных поверхностях необходимые соединения: антиадгезионные, антикоррозийные, гидрофобные, что особенно важно при резании полупроводников, диэлектриков, и дру-

гих материалов. Иными словами, открываются перспективы создания специальных высокоэффективных многофункциональных составов СОЖ.

Хотя проведенные работы уже дали первые практические результаты, потребуются еще огромные усилия для их дальнейшего развития. Дело в том, что кроме технических, необходимо преодолеть трудности иного характера. Главные из них состоят в том, что до настоящего времени в литературе существуют противоречия о механизме образования засаливания шлифовальных кругов и средствах повышения их работоспособности. Существуют и другие ошибочные представления, например, о механизме охлаждающего эффекта СОЖ, где отрицается возможность проникновения СОЖ в так называемую пластическую зону контакта, которые резко сужают возможности СОЖ и, таким образом, не содействуют развертыванию научно-исследовательских работ в этой важной области.

Физическая основа активационных процессов в твердых телах при электрическом (как и при механическом, тепловом, радиационном) воздействии заключается в смещении атомов из равновесного положения в узле решетки в неравновесное состояние. В результате одновременного перемещения в теле большого числа вакансий и образования внедренных атомов снижается энергия внутреннего трения, облегчается диффузия в материале. Торможение перемещения вакансий достигается путем выделения в структуре примесей. Так несовершенные металлические структуры, получают высокую прочность [14].

Подвергаясь действию электрического разряда, тонкие поверхностные слои металлической связки в определенных условиях могут упрочняться. Относительное упрочнение для таких сравнительно мягких материалов значительно. Следовательно, сопротивляемость связки при абразивном воздействии на нее твердых продуктов шлифования – стружки, осколков алмазных зерен и т. п. – повышается. С другой стороны, повышается и прочность удержания алмазных зерен в связке, что существенно уменьшает выпа-

дение их из рабочей поверхности круга, что препятствует обновлению режущей поверхности и работе в режиме самозатачивания. Следовательно, создаются благоприятные условия для образования засаленного слоя.

Таким образом, по нашему мнению, основополагающая роль при засаливании алмазных кругов на металлической связке принадлежит активационным процессам, протекающим в зоне контакта круга с обрабатываемой деталью. А также, в образовании двойного электрического слоя, за счет изменений кристаллического строения, как обрабатываемого материала, так и металлической связки круга.

Между тем научно-исследовательские работы в указанном направлении не только имеют важное научно-практическое значение, но могут дать актуальный и интересный материал для обогащения производственного опыта, учебного процесса и, несомненно, сблизят теорию шлифования и затачивания с фундаментальными науками, что очень важно для выхода науки о контактных процессах в практическую плоскость.

Список литературы

1. Янюшкин А.С., Архипов П.В. Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала. Технология металлов. 2010. № 1. С. 25-33.
2. Янюшкин А.С., Медведева О.И., Янюшкин С.А., Попов В.Ю. Физико-химическое взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов при комбинированном электрохимическом шлифовании. Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. 2012. Т. 1. С. 183-190.
3. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы её реализации/ Монография / А.С. Янюшкин. - Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии. - 2013. - 336 с.
4. Гордон М.Б., Янюшкин А.С. Высокоэффективная электрохимическая обработка твердых сплавов в режиме самозатачивания алмазного круга и одновременного травления поверхности изделий // Вестник машиностроения. 1984. №3. - С. 12-14.
5. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента. Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1 (1). С. 95-98.

6. Кудряшов С.М., Янюшкин А.С., Попов В.Ю. Использование минеральных рассолов для устранения засаленного слоя при комбинированной электроалмазной обработке быстрорежущей стали р6м5. Системы. Методы. Технологии. 2010. № 2 (6). С. 109-118.
7. Попов В.Ю., Янюшкин А.С., Андронов А.Ю. Результаты комплексного изучения состава засаленного слоя алмазных кругов. Системы. Методы. Технологии. 2014. № 1 (21). С. 114-120.
8. Патент № 2304504 RU, МПК В24В53/00, В23Н3/00. Метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления/ А.С. Янюшкин, А.А. Сурьев и др. Заявлено 31.01.2005; Оpubл. 20.08.2007, Бюл. 23.
9. Патент № 2268119 RU, МПК В23Н3/00, В23Н5/06, В23Н7/00. Способ автоматического управления режущей способностью абразивного круга на токопроводящей связке/ А.С. Янюшкин, А.А. Сурьев. Заявлено 26.04.2004; Оpubл. 20.01.2006, Бюл. 02.
10. Патент № 2239525 Российская Федерация С 1. Устройство для комбинированной электроалмазной обработки с непрерывной правкой круга / А.С. Янюшкин, С.П. Ереско, А.А. Сурьев, В.С. Ереско, А.М. Кузнецов. - № 2003105413; заявл. 25.02.2003; опубл. 10.11.2004, Бюл. № 31.
11. Патент РФ №2446039. Конструкция катода для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке / Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. и др. / Оpubл. 27.03.2012. Бюл. № 9.
12. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов. Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 1 (47). С. 178-183.
13. Афанасенко П.В., Янюшкин А.Р., Селина К.Р. Исследование процесса изготовления керамических изделий из порошков оксида алюминия // Механика XXI века. 2018. № 17. С.144-148.
14. Лобанов Д.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, П.В. Архипов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85-91.

References

1. Yanyushkin A.S., Arkhipov P.V. Atomno-molekulyarnye protsessy v zone almaznogo kruga i obrabatyvaemogo materiala. Tekhnologiya metallov. 2010. № 1. S. 25-33.
2. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Yanyushkin S.A., Popov V.Yu. Fiziko-khimicheskoe vzaimodeistvie instrumental'nogo i obrabatyvaemogo

- materialov pri kombinirovannom elektrokhimicheskom shli-fovani. Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. 2012. T. 1. S. 183-190.
3. Yanyushkin A.S. Tekhnologiya elektro-almaznogo zatachivaniya rezhushchikh instrumentov i metody ee realizatsii/ Monografiya / A.S. Yanyushkin. - Staryi Oskol: Tonkie naukoemkie tekhnologii. - 2013. – 336 s.
 4. Gordon M.B., Yanyushkin A.S. Vysoko-effektivnaya elektrokhimicheskaya obrabotka tverdykh splavov v rezhime samozatachivaniya almaznogo kruga i odnovermennogo travleniya poverkhnosti izdelii // Vestnik mashinostro-eniya. 1984. №3. – S. 12-14.
 5. Patent № 2304504 RU, MPK V24V53/00, V23N3/00. Metod avtomaticheskogo upravleniya protsessom nepreryvnoi elektrokhimicheskoi pravki kruga i ustroi-stvo dlya ego osushchestvleniya/ A.S. Yanyushkin, A.A. Sur'ev i dr. Zayavleno 31.01.2005; Opubl. 20.08.2007,. Byul. 23.
 6. Yanushkin A.S., Lobanov D.V., Kova-Levsky S.V. Improving the quality of carbide preparation. Systems Methods Technology. 2009. № 1 (1). Pp. 95-98.
 7. Kudryashov S.M., Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. The use of mineral brines to eliminate the greasy layer with the combined electric-diamond processing of high-speed steel p6m5. Systems Methods Technology. 2010. No. 2 (6). P. 109-118.
 8. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S., Andronov A.Yu. The results of a comprehensive study of the composition of the greasy layer of diamond wheels. Systems Me-Toda. Technology. 2014. № 1 (21). Pp. 114-120.
 9. Patent № 2268119 RU, MPK V23N3/00, V23N5/06, V23N7/00. Sposob av-tomaticheskogo upravleniya rezhushchei sposob-nost'yu abrazi-vnogo kruga na tokoprovodya-shchei svyazke/ A.S. Yanyushkin, A.A. Sur'ev. Zayav-leno 26.04.2004; Opubl. 20.01.2006,. Byul. 02.
 10. Patent № 2239525 Rossiiskaya Fede-ratsiya C 1. Ustroistvo dlya kombinirovannoi elektroalmaznoi obrabotki s nepreryvnoi pravkoi kruga / A.S. Yanyushkin, S.P. Eresko, A.A. Sur'ev, V.S. Eresko, A.M. Kuznetsov. - № 2003105413; zayavl. 25.02.2003; opubl. 10.11.2004, Byul. № 31.
 11. Patent RF №2446039. Konstruktsiya katoda dlya pravki kruga pri kombinirovan-noi elektroalmaznoi obrabotke / Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. i dr. / Opubl. 27.03.2012. Byul. № 9.
 12. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhi-pov P.V. Poterya rezhushchei sposobnosti al-maznykh kru-gov na metallicheskoj svyazke pri shlifovanii kompozitsionnykh materialov. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aero-kosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva. 2013. № 1 (47). S. 178-183.
 13. Afanasenko P.V., Yanyushkin A.R., Se-lina K.R. Issledovanie protsessa izgotovle-niya keramicheskikh izdelii iz poroshkov oksida alyuminiya // Mekhaniki XXI veku. 2018. № 17. S.144-148.
 14. Lobanov D.V. Napriazhenno-deformirovannoe sos-toianie tverdosplavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii/ D.V Lobanov., A.S. Ianiushkin P.V. Arkhipov // Vektor nauki Tol'iat-tinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 3-1 (33-1). S. 85-91.

УДК 519.3:05.011.56:621.865.8

ПРИМЕР КОНСТРУИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ УПРУГОГО ОБЪЕКТА

А.И. Бохонский¹, А.И. Рыжков¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

На примере упругой системы с одной степенью свободы раскрыты некоторые характерные особенности конструирования оптимального кососимметричного управления переносным движением из исходного состояния покоя в конечное состояние абсолютного покоя. Время движения найдено из моментных соотношений, как общих корней системы трансцендентных уравнений. Обращается также внимание на существование не единственности восстанавливаемого функционала при реализации реверсионной процедуры. Указано на возможные области использования результатов исследований.

Ключевые слова: переносное и относительное движения, оптимальное управление, функционал-критерий, достижение абсолютного покоя.

EXAMPLE OF CONTROLLED MOTION DESIGNING FOR AN ELASTIC OBJECT

A.I. Bokhonsky¹, A.I. Ryzhkov¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The example of an elastic system with one degree of freedom was used to illustrate some distinctive features of optimal skew-symmetric control construction for a portable motion from the initial state of rest to the final state of absolute rest. Time of motion was found from moment ratios, as the common roots of a system of transcendental equations. When reversal procedure was implemented, attention was given to the existence of a non-uniqueness for the restored functional. Possible areas of use of research results are indicated.

Keywords: portable and relative motion, optimal control, functional criterion, absolute rest achievement.

Введение

Задачам синтеза оптимальных управлений перемещением и колебаниями объектов посвящены работы [1-5]. Решение полной обратной задачи вариационного исчисления (от исходной функции через уравнение Эйлера как первой вариации функционала переход к восстанавливаемому функционалу-критерию) в [6] названо реверсионным исчислением.

Конструирование оптимальных управлений переносным поступательным и вращательным движением упругих объектов рассмотрено и исследовано в работах [7-9].

Целью исследования является совершенствование алгоритма реверсионного

конструирования оптимального управления движением объектов как абсолютно твердых и деформируемых систем.

После рассмотрения некоторых алгоритмических особенностей конструирования управлений, сам алгоритм иллюстрируется на примере оптимального управления переносным движением упругого объекта с одной степенью свободы.

1. Противоречия эквивалентных преобразований, связанных с дифференцированием функций и реверсионным восстановлением функционалов-критериев

Некоторые особенности восстановления функционалов по заданным аналитическим функциям иллюстрируются на одном элементарном примере для исходной функции

$$x(t) = x_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где x_0 , $\lambda = \text{const}$. Интересно, что функция (1) является общим решением уравнения первого порядка

$$\frac{dx}{dt} + \lambda x = 0 \quad (2)$$

при начальном условии $x(0) = x_0$. Если же начальное условие $x(0) = 0$, то единственным решением уравнения (2) является тривиальное $x(t) = 0$, [2].

После вычисления производных от исходной функции (1)

$$\frac{dx}{dt} = -x_0 \lambda \cdot e^{-\lambda t}, \quad \frac{d^2 x}{dt^2} = x_0 \lambda^2 \cdot e^{-\lambda t} \quad (3)$$

и преобразований, получены однородные дифференциальные уравнения второго порядка

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} - \lambda^2 x = 0. \quad (5)$$

Однородному уравнению (4) при начальных условиях $x(0) = x_0$, $\dot{x}(0) = v_0$ соответствует решение:

$$x(t) = \frac{x_0 \cdot \lambda + v_0}{\lambda} - v_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (6)$$

В данном случае уравнению (4) ставится в соответствие функционал

$$I_1 = \int_0^T \frac{\dot{x}^2}{2} \cdot e^{\lambda t} dt. \quad (7)$$

Уравнение (5) при принятых ранее начальных условиях имеет решение

$$x(t) = \frac{1}{2\lambda} \cdot \left[(\lambda x_0 - v_0) \cdot e^{-\lambda t} + (\lambda x_0 + v_0) \cdot e^{\lambda t} \right] \quad (8)$$

Теперь уравнению (8) соответствует функционал вида

$$I_2 = \int_0^T \left(\frac{\dot{x}^2}{2} + \frac{k^2 x^2}{2} \right) dt. \quad (9)$$

Если дифференциальное уравнение (4) описывает торможение материальной точки в среде с линейно-вязким сопротивлением, то уравнение (5) – движение материальной точки под действием силы, линейно зависящей от координаты.

Численный пример. При $x_0 = 0,5$ м, $v_0 = 1$ м/с, $\lambda = 1$ с⁻¹, $T = 1$ с функционал $I_1 = 0,364$, а функционал $I_2 = 1,824$.

Исходная функция (1) не в полной мере отражает реальное движение и приводит к не единственности восстановления функционала. Если функционал (7) является действием в форме Лагранжа, то функционал (9) – действием в форме Гамильтона.

2. Пример кососимметричного управления переносным движением упругого объекта

Как показано в работах [6-10], кососимметричное управление может представлять собой синус или косинус в нечетной степени.

Алгоритм реверсионного конструирования иллюстрируется на примере кососимметричного оптимального управления переносным движением объекта с одной степенью свободы. Заранее предполагается, что управление (ускорение переносного поступательного движения) имеет вид:

$$U_e(t) = a \cdot \sin^5(pt), \quad (10)$$

где a , $p = \text{const}$. Скорость и перемещение определяются путем интегрирования выражения (10) с учетом краевых условий:

$$S_e(0) = 0, V_e(0) = 0; S_e(T) = L, \quad (11)$$

где L – максимальное перемещение объекта по отрезку прямой. При этом вычисляются выражения для скорости и перемещения

$$V_e(t) = \int U_e(t) dt + C_1; S_e(t) = \int V_e(t) dt + C_2. \quad (12)$$

С учетом принятых условий (11) и (12) найдены константы C_1 , C_2 , a .

Для обеспечения косой симметрии управления принято $p = \frac{2\pi}{T}$, где T – общее время движения.

Таким образом, управление (ускорение) в переносном движении должно переместить объект на расстояние L из исходного состояния покоя в конечное состояние переносно-

го покоя. После определения констант следует:

$$\begin{aligned} S_e(t) &= \frac{L}{240\pi T} \left[\begin{aligned} &-9\sin^5\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \cdot T - 20\sin^3\left(\frac{2\pi t}{T}\right) - \\ &-120\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \cdot T + 240\pi t \end{aligned} \right], \\ V_e(t) &= -\frac{L}{8T} \left[\begin{aligned} &15\cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) - 10\cos^5\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + \\ &+ 3\cos^5\left(\frac{2\pi t}{T}\right) - 8 \end{aligned} \right], \\ U_e(t) &= \frac{15\pi L}{4T^2} \cdot \sin^5\left(\frac{2\pi t}{T}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

Для упругого объекта дифференциальное уравнение относительного движения (упругих колебаний без учета линейно-вязкого сопротивления) по отношению к движущейся поступательно системе координат записывается следующим образом:

$$\frac{d^2 x_r}{dt^2} + k^2 x_r = -U_e(t), \quad (14)$$

где k – частота собственных колебаний. Найдено достаточно громоздкое решение уравнения. Моментные соотношения, как равенство нулю относительного перемещения и скорости, принимают вид:

$$x_r(T) = 0, \quad \dot{x}_r(T) = 0. \quad (15)$$

Они представляют собой систему трансцендентных уравнений, общими корнями которой является время T . С учетом выражения для частоты собственных колебаний упругой системы $k = \frac{2\pi}{T} \cdot n$, где

$p = \frac{k}{n}$ система (15) преобразуется к простому виду:

$$\begin{aligned} x_r(n) &= \sin(2\pi n) = 0, \\ \dot{x}_r(n) &= \cos(2\pi n) - 1 = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Графики $x_r(n)$ и $\dot{x}_r(n)$, изображенные на рис.1, подтверждают существование общих корней: $n = 2, 3, 4, \dots$.

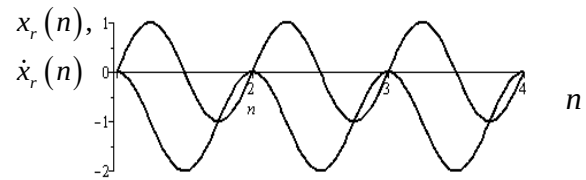


Рис. 1. Графики $x_r(n)$ и $\dot{x}_r(n)$

Для исходных данных $L=2\text{м}$, $T=4\pi$, $k=1$ графики переносного движения изображены на рис.2, а графики относительного движения на рис.3. Из графиков следует, что в момент времени $t=T$ наступает абсолютный покой как суперпозиция переносного и относительного покоя.

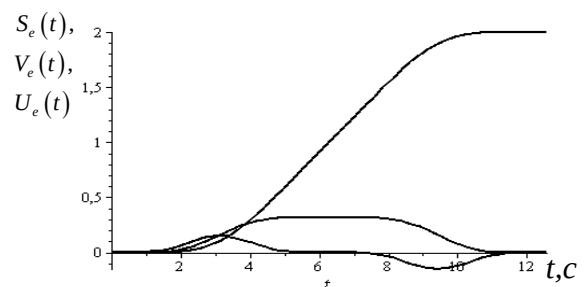


Рис.2. Графики переносного движения: $S_e(t)$, $V_e(t)$, $U_e(t)$

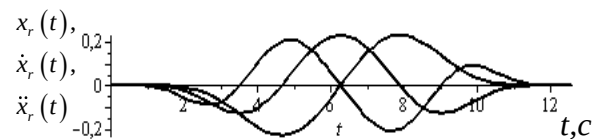


Рис.3. Графики относительного движения: $x_r(t)$, $\dot{x}_r(t)$, $\ddot{x}_r(t)$

Функция $S_e(t)$, отражающая переносное движение, в том числе является решением уравнения Эйлера

$$\frac{d^2 S_e(t)}{dt^2} + \frac{100\pi}{T^2} S_e(t) = R(t), \quad (17)$$

где

$$R(t) = \frac{25\pi L}{3T^3} \cdot \left[-\sin^3\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \cdot T - 6\sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \cdot T + 2\pi t \right].$$

Уравнению Эйлера (17) будет соответствовать реверсионно восстановленный функционал-критерий

$$I = \int_0^T \left(\frac{S_e^2}{2} - \frac{100\pi}{2T^2} \cdot S_e^2 + R(t) \cdot S_e \right) dt, \quad (18)$$

который принимает стационарное значение в действительном переносном движении объекта как абсолютно твердого тела.

Представляется возможность сравнить энергии, затраченные на перемещение объекта с использованием управления (10) и управления, найденного вариационным методом [1] с критерием $I_1 = \int_0^T U_e(t) dt$. Энергия при переносном движении массы $m = 1$ кг. вычисляется согласно зависимости

$$A = 2 \int_0^T U_e(t) \cdot V_e(t) dt. \quad (19)$$

В работе [10] показано, что существует широкий класс кососимметричных управлений, для которых существенно снижается энергия при их реализации.

Заключение

1. Подтверждено существование одного из типов кососимметричного управления переносным движением с достижением абсолютного покоя в момент времени $t = T$.

2. Полученное управление применимо для реализации оптимальных переносных поступательных и вращательных движений в автоматизированном сборочном производстве.

Список литературы

1. Воронов А.А. Теория автоматического управления. ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М., Высш. школа, 1977. – 288 с.
2. Петров Ю.П. Обеспечение достоверности и надежности компьютерных расчетов / Ю.П. Петров – СПб: БХВ – Петербург, 2008. – 160 с.
3. Карновский И.А., Почман Ю.М. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем – К. «Высш. школа», 1982. – 416 с.
4. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями. / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
5. Крутько, П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

6. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. Монография. – М. Вузовский учебник. ИНФРА. – М., 2016. – 174 с.
7. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисление в механике: монография / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Севастополь, СевНТУ, 2007. – 296 с.
8. Бохонский, А.И., Варминская Н.И., Мозолевский М.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения. /Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь, изд-во Сев НТУ, 2007. – 296 с.
9. Bokhonsky, A.I. Modeling and analysis of elastic systems in motion/ Gliwice. Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.
10. Бохонский, А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов. Фундаментальные основы механики: Материалы международной научно-Опракточеской конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – N2. –С. 38-41.

References

1. Voronov A.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. ch.II. Teoriya nelineynyh i special'nyh si-stem avtomaticheskogo upravleniya. – M., Vyssh. shkola, 1977. – 288s.
2. Petrov Yu.P. Obespechenie dostovernosti i nadezhnosti komp'yuternyh raschetov / Yu.P. Petrov – SPb: BHV – Peterburg, 2008. – 160s.
3. Karnovskij I.A., Pochman Yu.M. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemym sistem – K. «Vyssh. shkola», 1982. – 416 s.
4. Chernous'ko F.L. Upravlenie kolebaniyami. / F.L. Chernous'ko, P.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 s.
5. Krut'ko, P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravly-aemyh sistem: linejnye modeli. – M.: Nauka, 1987. – 304s.
6. Bohonskij A.I. Reversionnyj princip opti-mal'nosti. Monografiya. – M. Vuzovskij ucheb-nik. INFRA. – M., 2016. – 174s.
7. Bohonskij A.I. Variacionnoe i reversionnoe ischislenie v mekhanike: monografiya / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – Sevastopol', SevNTU, 2007. – 296 s.
8. Bohonskij, A.I., Varminskaya N.I., Mozolevskij M.I. Optimal'noe upravlenie perenosnym dvizheniem deformiruemym ob"ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya. /Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol', izd-vo Sev NTU, 2007. – 296 s.
9. Bokhonsky, A.I. Modeling and analysis of elastic systems in motion/ Gliwice. Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171p.
10. Bohonskij, A.I. Energoemkost' upravleniya peremeshcheniem ob"ektov. Fundamental'nye osnovy mekhaniki: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-Opraktocheskoj konferencii. – Novo-kuzneck: NIC MS, 2017. – N2. –С. 38-41.

УДК 669.295:661.882

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГОРЯЧЕПРЕССОВАННОЙ ТРУБЫ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПТ7М

Ф.В. Водолазский¹, Е.А. Горностаева², А.Г. Илларионов¹¹«Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Российская Федерация²ООО "ТМК НТЦ", Сколково, Российская Федерация

Аннотация

В работе рассмотрено формирование структуры, текстуры, дюрометрических и механических характеристик по сечению горячепрессованной трубы из титанового сплава ПТ-7М (Ti-2,2Al-2,7Zr, мас. %). Структура, текстура и свойства полученной горячепрессованной трубы диаметром 102 мм и толщиной 13 мм определяется распределением температурного поля по сечению трубной заготовки в процессе деформации. Подстуживание внешних поверхностных в сечении около 2,5 мм трубной заготовки в ходе прессования до температур α -области способствует формированию структуры из преимущественно деформированной α -фазы. Деформационный разогрев при прессовании областей трубы на расстоянии более 2,5 мм от внешней поверхности до температур вблизи $T_{\text{пр}}$ обеспечивает получение β -превращенной структуры с более низкими прочностными и более высокими пластическими характеристиками по сравнению с внешней приповерхностной областью.

Ключевые слова: титановый сплав ПТ-7М, горячее прессование, структура, текстура, механические свойства.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF HOT-EXTRUDED TUBE OF TITANIUM ALLOY PT7M

F.V. Vodolazskiy¹, E.A. Gornostaeva², A.G. Illarionov¹¹Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation²TMK research and development facility, TMK-Skolovo, Russian Federation

Abstract

In this paper, the formation of the structure, texture, durometric and mechanical characteristics of the cross section of a hot-extruded tube made of titanium alloy PT-7M (Ti-2.2Al-2.7Zr, wt.%) is considered. The structure, texture and properties of the tube with a diameter of 102 mm and a thickness of 13 mm is determined by the distribution of the temperature over the cross section of the billet during the deformation process. The cooling of the outer surface area of about 2.5 mm of the billet during extrusion to temperatures of the α -region result to the formation of a structure from a predominantly deformed α -phase. Deformation heating during extrusion at a distance of more than 2.5 mm from the outer surface to temperatures near the T_{pr} result to the formation of β -transformed structure with lower strength and higher plastic properties as compared to the outer near-surface area.

Keywords: titanium alloy PT-7M, hot pressing, structure, texture, mechanical properties.

Введение

ПТ-7М относится к α -сплавам титана [1], которые при комнатной температуре на 100% состоят из α -фазы, имеющей ГПУ решетку. Сплав относится к системе Ti-Al-Zr [2]. Легирование сплава алюминием до 2,5 мас.%, цирконием до 3 мас.% [3] обеспечивает ему, по сравнению с техническим титаном, более высокие литейные свойства, прочность, термическую стабильность, со-

противление ползучести, температуру полиморфного $\alpha+\beta$ -превращения ($T_{\text{пр}}$) и сохранение высокой коррозионной стойкости и технологической пластичности в горячем и холодном состоянии, отсутствии склонности к хладноломкости, хорошей свариваемости [4-6]. Благодаря своему комплексу свойств сплав ПТ-7М преимущественно используется для изготовления трубопроводов, работающих при комнатной и повышенных (до 400-450°C) температурах в агрессивных средах [3, 7]. Трубные полуфабрикаты из тита-

новых сплавов на начальном этапе получают главным образом горячим прессованием [8] из трубной заготовки. В работе [9] установлено, что для макро- и микроструктуры по сечению крупногабаритной трубной заготовки из сплава ПТ-7М характерно уменьшение доли крупных макро- и рекристаллизованных зерен от центра к поверхности полуфабриката, что способствует росту твердости и истинных напряжений при горячих испытаниях на сжатие по мере удаления центра заготовки. В работе [10] изучено влияние температуры и степени деформации при осадке сплава ПТ-7М на силовые параметры реализации процесса в области температур проведения горячего прессования труб. Однако в научной литературе практически нет данных о структурном состоянии по сечению горячепрессованных труб из сплава ПТ-7М и формируемом комплексе механических свойств, которые имеют как научный, так и практический интерес. В связи с этим в настоящей работе изучено изменение структуры, текстуры и комплекса свойств по сечению трубы из сплава ПТ-7М, полученной методом горячего прессования.

Материал и методики исследования

Материалом для исследования служили образцы из сплава ПТ-7М (Ti-2,2Al-2,7Zr, мас.%), вырезанные из трубы диаметром 102 мм с толщиной стенки 13 мм, полученной горячим прессованием на горизонтальном прессе с температур нагрева в двухфазной ($\alpha+\beta$)-области ($T_{\text{пп}} = (20...40)^\circ\text{C}$) из исходной горячедеформированной заготовки, имеющей $T_{\text{пп}}=945^\circ\text{C}$ и изученной в работе [9]. Методиками исследования в работе служили макро-, микро-, рентгеноструктурный анализы, испытания на твердость и растяжение. Макроанализ структуры проводили визуально на поперечном и продольном сечениях. Макротравление проводили в 15% растворе плавиковой кислоты в соответствии с рекомендациями монографии [11]. Микроструктуру изучали на оптическом микроскопе «OLYMPUS GX51» в 3-х характерных областях – у внутренней, внешней поверхности и на $\frac{1}{2}$ толщины трубы. Образцы для микроструктурных исследований

травили в растворе 2%HF + 2% HNO₃ + 94% H₂O. Рентгеноструктурный фазовый анализ проведен на установке «Bruker D8 Advance» в медном K α - излучении в диапазоне углов $2\theta = 34...102^\circ$. Количественный рентгенофазовый анализ проводился по методу безэталонного полнопрофильного анализа Ритвельда [12] с помощью программного пакета TOPAS® 4.2. Анализ текстуры осуществляли методом дифракции обратно-рассеянных электронов на растровом электронном микроскопе Zeiss Auriga с помощью приставки HKL Premium EBSD System Nordlys II S. Для измерения твердости по Виккерсу [13] использовали твердомер Zwick/Roell ZHU type 6187-5 LKV при нагрузке 100 кг (980,7 Н). Замер твердости проводился от внутренней к внешней поверхности поперечного трубы с шагом в радиальном направлении 2 мм между отпечатками. Механические испытания на растяжение осуществляли на цилиндрических продольных образцах с $d_0 = 6$ мм (тип III в соответствии с [14]) на разрывной машине MTS Insight 100.

Результаты исследований и их обсуждение

Макроструктура поперечного и продольного сечения горячепрессованной трубы из сплава ПТ-7М характеризуется преимущественно 2-м баллом (рис. 1) по 10-ти балльной шкале макроструктуры титановых сплавов [15]. На большей части поверхности в поперечном и продольном сечении для макрозерна характерно отсутствие неравномерности, что возможно при достаточно полном развитии рекристаллизационных процессов в ходе горячего прессования, за исключением полосы толщиной около 2,5 мм у внешней поверхности, которая имеет типичное волокнистое строение, наиболее отчетливо проявляющееся в продольном сечении (рис. 1, б). Такая макроструктура в данной зоне свидетельствует о сохранении нерекристаллизованной структуры, вероятнее всего из-за подстуживания внешней поверхности заготовки сплава перед началом прессования.

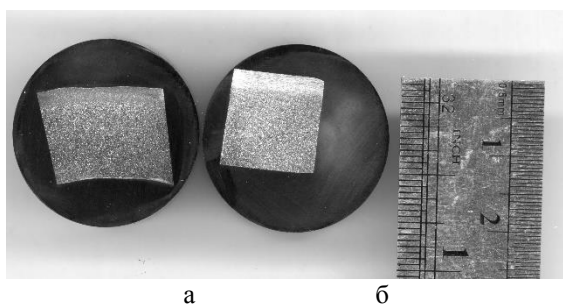


Рис. 1. Макроструктура в поперечном (а) и продольном (б) сечении темплетов от горячепрессованной трубы из сплава ПТ-7М

Микроструктура сплава ПТ-7М в трех различных зонах продольных и поперечных образцов трубы – у внутренней, внешней поверхности и на $\frac{1}{2}$ сечения трубы представлена на рис. 2.

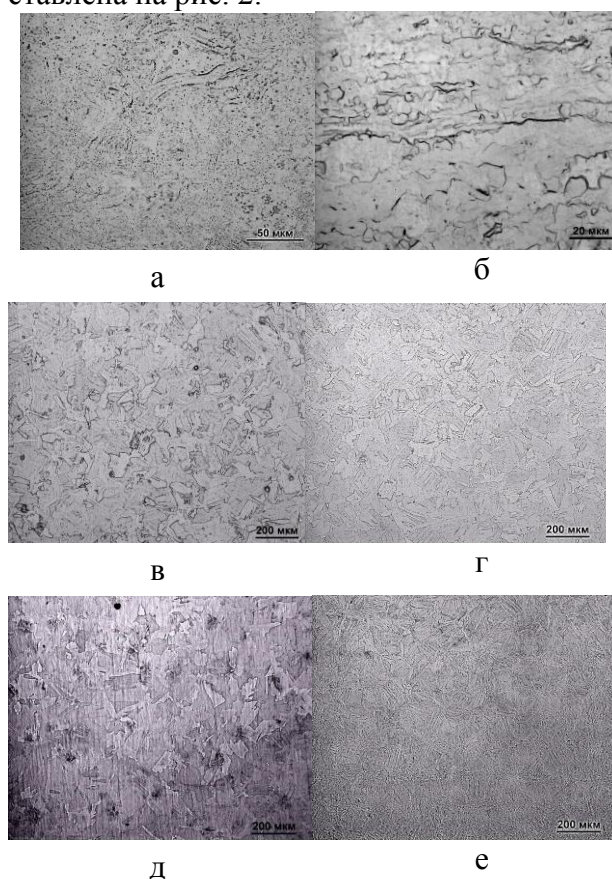


Рис. 2. Микроструктура с поперечного (а, в, д) и продольного (б, г, е) сечения темплета от горячепрессованной трубной заготовки из сплава ПТ-7М в разных областях: а, б – около внешней поверхности; в, г – на $\frac{1}{2}$ сечения; д, е – вблизи внутренней поверхности

Зеренная структура (рис. 2 а, б) вблизи внешней поверхности имеет характерную вытянутость вдоль оси трубы, в отличие от внутренней поверхности и $\frac{1}{2}$ сечения горячепрессованной трубы (рис. 2 г, е), где фик-

сируются равноосные рекристаллизованные зерна размером в диапазоне 100-400 мкм, с неровными границами, что характерно при развитии динамической рекристаллизации [16]. При этом как в продольном, так и поперечном сечении трубы на внутренней поверхности и $\frac{1}{2}$ толщины трубы не выявлено вытянутости образующихся зерен, что свидетельствует о достаточно полном прохождении процесса первичной рекристаллизации, обеспечивающего в этих областях измельчение зеренной структуры по сравнению с исходной трубной заготовкой в которой, согласно работе [9], размер зерна мог превышать 1000 мкм.

Для внутризеренной структуры как в продольном, так и поперечном сечении на внутренней и $\frac{1}{2}$ толщины трубы характерно формирование пакетов α -пластин, которые внутри зерна могут иметь несколько ориентировок (рис. 2 г, е.). При этом пластины преимущественно прямые, недеформированные, что свидетельствует об их образовании не в ходе прессования, а в процессе охлаждения после деформации. Для внешней поверхности характерно, что пластины в поперечном сечении могут быть существенно изогнуты и деформированы (рис. 2, а), а в продольном сечении кроме вытянутых деформированных зерен фиксируется присутствие новых равноосных рекристаллизованных α -зерен (рис. 2, б).

Наблюдаемое различие в структуре около внешней поверхности по сравнению с внутренней поверхностью и $\frac{1}{2}$ толщины трубы мы объясняем неоднородным распределением температуры по сечению заготовки перед и в ходе прессования вследствие подстуживания поверхности. В результате этого внешние поверхностные слои деформировались в α -области преимущественно при температурах вблизи температуры начала рекристаллизации, что способствовало формированию сильно вытянутой зеренной структуры вдоль направления прессования с небольшой объемной долей равноосных первично рекристаллизованных α -зерен.

Что касается внутренней поверхности и $\frac{1}{2}$ толщины трубы, то они практически не испытали снижения температуры из-за под-

стуживания и их деформация при прессовании проходила при температурах вблизи температуры полиморфного $\alpha+\beta$ -превращения ($T_{\text{пп}}$) [17]. Плюс к этому в ходе деформации происходит дополнительный разогрев сплава [10] вплоть до температур выше $T_{\text{пп}}$, то есть в β -область, обеспечивая развитие в β -фазе процесса рекристаллизации. Последующее охлаждение на воздухе, достаточно медленное для такого сечения, обеспечивает протекание обратного β - α -превращения с образованием наблюдаемой структуры пакетной морфологии. Но в целом перегрев в β -область незначительный, что позволило получить во внутренних объемах трубы относительно мелкое первично рекристаллизованное β -превращенное зерно в ходе деформации и охлаждения. Развитие процесса рекристаллизации в данном случае так же вполне естественно, так как, например, для сплава ОТ4-1 (Ti-2Al-1,5Mn) с близким к ПТ-7М содержанием алюминия и $T_{\text{пп}}$ (910-950°C) температура конца рекристаллизации составляет около 840°C [17], что существенно ниже температуры разогрева исследуемой заготовки при прессовании.

Количественная оценка объемной доли фаз по методу Ритвельда в образце от горячепрессованной трубы из сплава ПТ-7М (рис. 3) показала, что он на 100% состоит из α -фазы, как это и характерно для α -сплавов [1]. Параметры решетки α -фазы составляют: $a=0,2947$ нм. $c=0,4688$ нм, $c/a=1,591$. Полученный параметр «с/а» α -фазы выше, чем у нелегированного титана (1,583) [18], очевидно, из-за легирования сплава ПТ-7М алюминием и цирконием, повышающих параметр «с/а» [19].

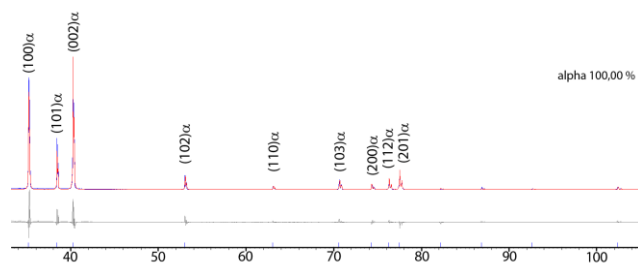


Рис. 3. Дифрактограмма с поперечного сечения горячепрессованной трубы из сплава ПТ-7М

Для оценки изменения текстуры α -фазы в различных сечениях горячепрессованной трубы методом EBSD были получены обратные полюсные фигуры (ОПФ) вблизи внешней и внутренней поверхности и с $\frac{1}{2}$ толщины сечения, представленные на рис. 4.

Анализ полученных ОПФ показал, что по сечению трубы существенно изменяется текстурное состояние. Вблизи внешней поверхности фиксируется относительно сильная тангенциальная текстура $\{0001\}$ ТН<10-10>НП (рис. 4, а), которая часто формируется в трубах при деформации α -фазы [20]. Это согласуется с данными микроструктурных исследований (рис. 2) и связано, как отмечено выше с подстуживанием поверхности в процессе проведения прессования трубы.

Текстура сплава на $\frac{1}{2}$ толщины стенки более слабая – максимальная интенсивность компонент снижается до 2,36 по сравнению с 6,48 у внешней поверхности (рис. 4 а, б). При этом наиболее сильные отражения $\{0001\}$, $\{10-11\}$ (обе в НП), $\{11-24\}$, $\{11-20\}$ и $\{11-30\}$ (все в РН) (рис. 4, б). Наличие данных ориентировок в текстуре α -фазы можно связать с ее формированием в результате β - α - превращения. В этом случае сильные отражения $\{0001\}$, $\{10-11\}$ связаны с отражениями от плоскостей типа $\{110\}$ β -фазы, а отражения $\{11-24\}$, $\{11-20\}$ и $\{11-30\}$ с отражениями от плоскостей типа $\{111\}$ β -фазы [21]. Наличие компонент $\{110\}$ в НП и $\{111\}$ в РН в высокотемпературной β -фазе характерно для ее текстуры деформации $\{111\}$ РН<110>НП часто встречающейся в сплавах с ОЦК - решеткой [21]. Это также согласуется с данными микроструктурного анализа (рис. 2), исходя из которых в результате деформационного разогрева в данном сечении температура в ходе прессования была около $T_{\text{пп}}$ и деформации подвергалась именно β -фаза, которая при охлаждении испытывает превращение в α -фазу по ориентационному соотношению Бюргерса [19]: $\{110\}_{\beta} // \{0001\}_{\alpha}$, $\langle 111 \rangle_{\beta} // \langle 11-20 \rangle_{\alpha}$, обеспечивая появление соответствующей текстуры превращения.

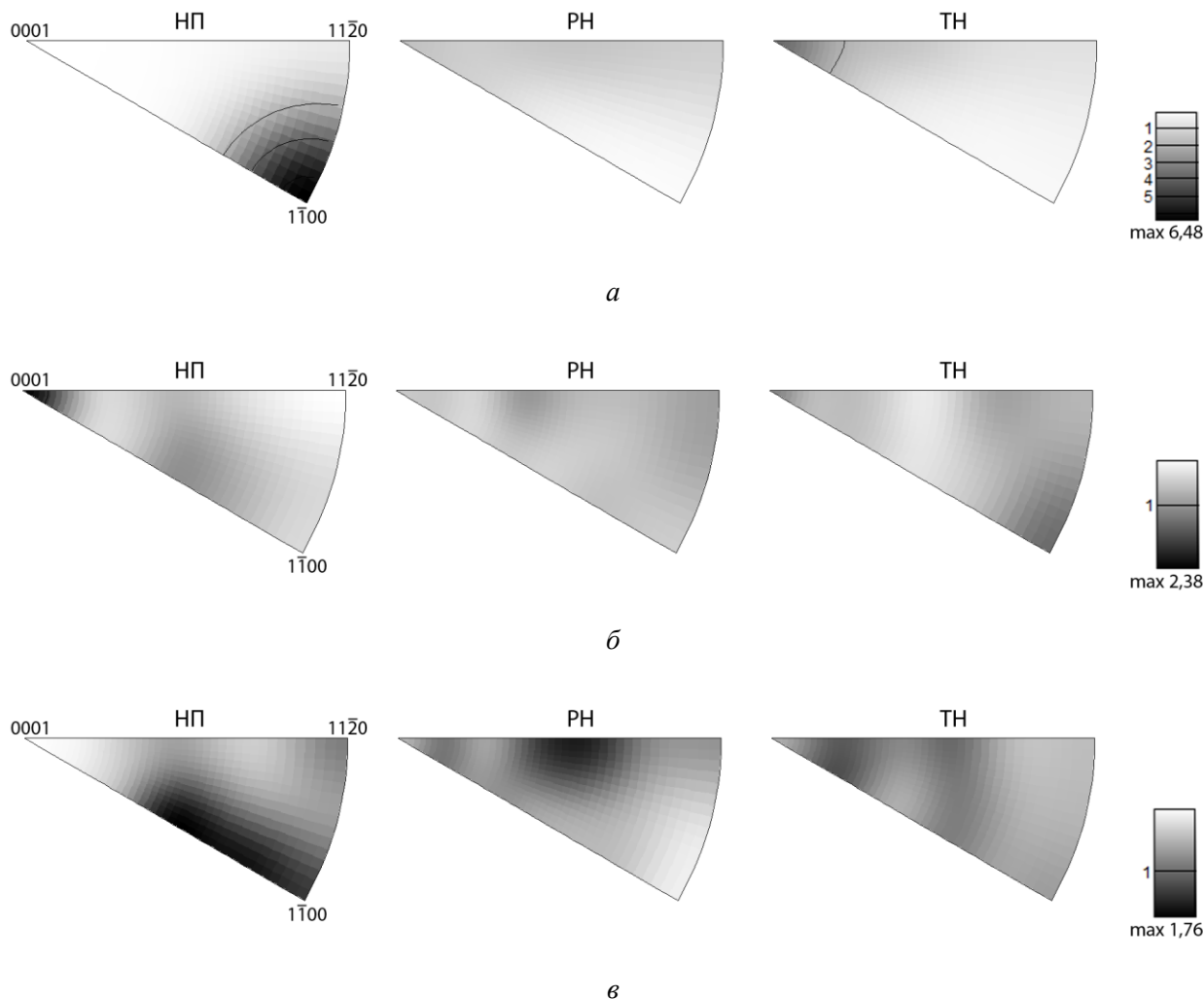


Рис. 4. ОПФ с различных сечений горячепрессованной трубы из сплава ПТ-7М: *а* – вблизи внешней поверхности, *б* – ½ толщины стенки, *в* – вблизи внутренней поверхности (НП – направление прессования, РН – радиальное направление, ТН – тангенциальное направление)

Вблизи внутренней поверхности трубы острота текстура α -фазы еще уменьшается (максимальная интенсивность составляет только 1,76) и наиболее сильные отражения дают плоскости $\{10\cdot11\}$ (в НП) и $\{11\cdot22\}$ (в РН) (рис. 4 в). Наличие данных ориентировок в текстуре α -фазы также можно связать с ее формированием в результате β - α - превращения. В этом случае сильные отражения от плоскостей $\{10\cdot11\}$ α - фазы кристаллографически связаны с отражениями от плоскостей типа $\{110\}$ β -фазы, а отражения $\{11\cdot22\}$ с отражениями от плоскостей типа $\{112\}$ β -фазы [21]. Наличие компонент $\{110\}$ в НП и $\{112\}$ в РН в высокотемпературной β -фазе характерно еще для одной текстуры дефор-

мации $\{112\}$ РН<110>НП часто встречающейся в сплавах с ОЦК - решеткой [21]. Данный факт также согласуется с данными микроанализа (рис. 2) в соответствии с которым внутренние слои трубы как и на ½ толщины трубы имели более высокую температуру, чем у внешней поверхности (вблизи $T_{\text{пл}}$) в ходе прессования, в результате формируемая при деформации текстура в β -фазе наследуется α -фазой в ходе β - α -превращения при охлаждении с температур деформации. Изменение текстуры β -фазы при переходе от ½ толщины сечения трубы к внутренней поверхности, по-нашему мнению связано с влиянием поверхностного трения на процессы деформации, что как известно [21] влияет на формирование текстуры.

Результаты измерений твердости вдоль радиуса трубы представлены на рисунке 5. Из рисунка видно, что вблизи внутренней поверхности и на твердость более низкая, чем у внешней поверхности, а вблизи $\frac{1}{2}$ толщины сечения трубы имеет промежуточные значения. Очевидно фиксируемое различие связано с отмеченными при структурном исследовании отличиями формируемой структуры в этих зонах – полностью рекристаллизованной и соответственно более «мягкой» во внутренних объемах трубы и частично рекристаллизованной – более «твердой» у внешней поверхности.

Сравнение полученных данных по твердости в горячепрессованной трубной заготовке с исходным горячедеформированным состоянием показало, что проведение горячего прессования способствовало, уменьшению разброса значений твердости в 1,3 раза с 35 ед. HV (190-225 HV) [9] до 27 ед. HV (195-222 HV). При этом среднее значение практически не изменилось и составило 207 HV соответственно.

Данные по механическим свойствам горячепрессованной трубы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Механические свойства горячепрессованной трубы из сплава ПТ-7М

Но мер об- разца	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
1	597	495	21,7
2	614	498	18,6
3	590	499	23,3

Видно, что прочностные и пластические свойства имеют определенный разброс. Данный разброс связан с местом вырезки образца. Наиболее низкие прочностные свойства и максимальные пластические характеристики для образца, вырезанного вблизи внутренней поверхности трубы, где наиболее полно прошли в ходе горячей деформации процессы рекристаллизации, максимальные прочностные свойства и минимальные значения пластичности характерны

для образца, вырезанного вблизи внешней поверхности трубы, где из-за подстуживания при проведении прессования процессы рекристаллизации получили ограниченное развитие и материал сохранил деформационный наклеп, а средние значения прочностных и пластических характеристик характерны для образца, вырезанного из $\frac{1}{2}$ сечения трубы, в котором развитие процесса рекристаллизации идет активнее, чем у поверхности, но более медленно, чем у внутренней поверхности. Можно отметить, что в исследуемой горячепрессованной трубе из сплава ПТ-7М средние значения механических свойств ($\sigma_b=600$ МПа $\sigma_{0,2}= 497$ МПа $\delta_5=21\%$) попадают в диапазон значений, характерных для труб из данного сплава [1].

Выводы

Структура, текстура и свойства полученной горячепрессованной трубы диаметром 102 мм и толщиной 13 мм из исследуемого α -сплава титана ПТ-7М определяется распределением температурного поля по сечению трубной заготовки в процессе деформации.

Подстуживание внешних поверхностных в сечении около 2,5 мм трубной заготовки в ходе прессования до температур α -области способствует формированию структуры из преимущественно деформированной α -фазы, имеющей типичную текстуру $\{0001\}TN<10-10>HP$.

Деформационный разогрев при прессовании областей трубы на расстоянии более 2,5 мм от внешней поверхности до температур вблизи $T_{\text{пп}}$ обеспечивает получение β -превращенной структуры с более низкими прочностными и более высокими пластическими характеристиками по сравнению с внешней приповерхностной областью, состоящей из пакетов α -пластин в β -зерне и имеющей текстуру $\beta-\alpha$ превращения, связанную с текстурами деформации β -фазы - $\{111\}PH<110>HP$ и $\{112\}PH<110>HP$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10107)

Список литературы

1. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. М.: МИСиС. 2005. 432 с.
2. Effenberg G., Ilyenko S. Ternary Alloy Systems: Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data critically evaluated by MSIT®. Light Metal Systems. Part 4 // Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry. Volume 11A4. 2006. (DOI: 10.1007/b97924)
3. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.:ВИЛС-МАТИ, 2009, 520 с.
4. Moiseev V.N. Titanium in Russia //Metal Science and Heat Treatment. 2005. V. 47. № 7-8. pp. 371-376.
5. Горынин И.В., Ушков С.С., Хатунцев А.Н., Лошакова Н.И. Титановые сплавы для морской техники // СПб: Политехника. 2007. 387 с.
6. Анисимов А.П., Антипов В.В., Копылов В.Н., Ртищева Л.П., Смирнов В.Г., Харин А.А. Патент WO 2016068748 A1 Способ изготовления труб со спиральными ребрами. Опубликовано 6 мая 2016 г.
7. Колачев Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г., Талалаев В.Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники. Под. ред. Братухина А.Г. М.: Изд-во МАИ, 2001, 416 с.
8. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белов А.Ф. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: ОНТИ ВИЛС 1996, 584 с.
9. Vodolazskiy F.V., Illarionova S.M., Barannikova N.A., Kosmatskiy Ya.I., Gornostaeva E.A., Illarionov A.G. Relationship Between Structure and Properties of the Large-Size Billet of Titanium Alloy PT-7M //XIX International scientific-technical conference "The Ural school-seminar of metal scientists-young researchers". KnE Engineering, 2019, pp. 267-274.
10. Космацкий Я.И., Фокин Н.В., Филяева Е.А., Баричко Б.В. Исследование деформационной способности трубной заготовки из титанового сплава марки ПТ-7М //Титан. 2017. № 4 (58). С. 34-39.
11. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. Под ред. Глазунова С.Г., Колачева Б.А. //М.: Металлургия, 1980. 464 с.
12. H. M. Rietveld A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. // Journal of Applied Crystallography, 1969, № 2, pp. 65-71.
13. ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 Металлы и сплавы. Измерение твердости по Виккерсу. Часть 11. Метод измерения М.: Стандартиформ, 2008. 19 с.
14. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартиформ, 2008. 22 с.
15. Никольский Л.А., Фиглин С.З., Бойцов В.В., Калпин Ю.Г., Бахарев А.В. Горячая штамповка

и прессование титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1975, 285 с.

16. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капусткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 2005. 432 с.
17. Колачев Б.А., Габидуллин Р.М., Пигузов Ю.В. Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1992. 352 с.
18. Aurelio, G., Fernandez Guillermet, A., Cuello, G.J., Campo, J. Metastable phases in the Ti-V system: Part I. Neutron diffraction study and assessment of structural properties //Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2002. 33(5), 57, pp. 1307-1317
19. Цвиккер У. Титан и его сплавы М.:Мир. 1979. 512 с.
20. Pyshmintsev, I.Y., Kosmatskii, Y.I., Filyaeva, E.A., Illarionov A.G., Vodolazskii, F.V., Barannikova, N.A. Alloy Ti-3Al-2.5V Hot-Extruded Pipe Metal Structure and Properties // Metallurgist . 2018. 62 (3-4), pp. 374-379.
21. Бабарэко А.А. Текстуры металлов и сплавов. // В сб. Итоги науки и техники. Серия Металловедение и термическая обработка. Т.13. М. : ВИНТИ. 1980. С. 79-148.

References

1. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. Metal science and heat treatment of metals and alloys. M.: MISiS. 2005. 432 p.
2. Effenberg G., Ilyenko S. Ternary Alloy Systems: Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data critically evaluated by MSIT®. Light Metal Systems. Part 4 // Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry. Volume 11A4. 2006. (DOI: 10.1007/b97924)
3. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. Directory. M.: VILS-MATI, 2009, 520 p.
4. Moiseev V.N. Titanium in Russia //Metal Science and Heat Treatment. 2005. V. 47. № 7-8. pp. 371-376.
5. Gorynin I.V., Ushkov S.S., Khatuntsev A.N., Loshakova N.I. Titanium alloys for marine engineering// SPb: Polytechnic. 2007. 387 p.
6. Anisimov A.P., Antipov V.V., Kopylov V.N., Rtsheva L.P., Smirnov V.G., Kharin A.A. Patent WO 2016068748 A1 Method for manufacturing pipes with spiral ribs. Published May 6, 2016
7. Kolachev B.A., Eliseev Yu.S., Bratukhin A.G., Talalaev V.D. Titanium alloys in the construction and production of aircraft engines and aerospace equipment. Ed. Bratukhina A.G. M.: Izd-vo MAI, 2001, 416 p.
8. Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Belov A.F. et al. Semi-finished products from titanium alloys. M.: ONTI VILS 1996, 584 p.

9. Vodolazskiy F.V., Illarionova S.M., Barannikova N.A., Kosmatskiy Ya.I., Gornostaeva E.A., Illarionov A.G. Relationship Between Structure and Properties of the Large-Size Billet of Titanium Alloy PT-7M //XIX International scientific-technical conference "The Ural school-seminar of metal scientists-young researchers". KnE Engineering, 2019, pp. 267-274.
10. Kosmatsky Ya.I., Fokin N.V., Filyaeva E.A., Barichko B.V. Investigation of the deformation capacity of a tubular billet of titanium alloy grade PT-7M // Titan. 2017. No. 4 (58). pp. 34-39.
11. Titanium alloys. Metallography of titanium alloys. Ed. Glazunova S.G., Kolacheva B.A. // М.: Metallurgiya, 1980. 464 p.
12. H. M. Rietveld A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. // Journal of Applied Crystallography, 1969, № 2, pp. 65-71.
13. GOST R ISO 6507-1-2007 Metals and alloys. Vickers hardness measurement. Part 11. Method of measurement М.: Standardinform, 2008. 19 p.
14. GOST 1497-84 Metals. Methods for tensile testing. М.: Standardinform, 2008. 22 p.
15. Nikolsky L.A., Figlin S.Z., Boytsov V.V., Kalpin Yu.G., Bakharev A.V. Hot stamping and pressing of titanium alloys. М.: Mashinostroenie, 1975, 285 p.
16. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. Recrystallization of metals and alloys. 3rd ed., Pererab. and add. М.: MISIS, 2005. 432 p.
17. Kolachev B.A., Gabidullin R.M., Piguzov Yu.V. The technology of heat treatment of non-ferrous metals and alloys. М.: Metallurgiya, 1992. 352 p.
18. Aurelio, G., Fernandez Guillermet, A., Cuello, G.J., Campo, J. Metastable phases in the Ti-V system: Part I. Neutron diffraction study and assessment of structural properties //Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. 2002. 33(5), 57, pp. 1307-1317
19. Zwicker U. Titan and its alloys М.: Mir. 1979. 512 p.
20. Pyshmintsev, I.Y., Kosmatskii, Y.I., Filyaeva, E.A., Illarionov A.G., Vodolazskii, F.V., Barannikova, N.A. Alloy Ti-3Al-2.5V Hot-Extruded Pipe Metal Structure and Properties // Metallurgist . 2018. 62 (3-4), pp. 374-379.
21. Babareko A.A. Textures of metals and alloys // Results of science and technology. Series Metallurgy and heat treatment. V.13. М.: VINITI. 1980. pp. 79-148.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №2(14) 2019

Рубрики в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

- Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (05.02.07)
- Технология машиностроения (05.02.08)
- Металлургия и материаловедение (05.16.00)

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д. 14, каб. 163

<http://sevsu.ru/nauka/pechatnye-izdaniya>

Телефон редакции: 8(692)41-77-41 добавочный 1150

e-mail: vst_sevsu@mail.ru

Публикуемые материалы прошли процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на сборник научных трудов «Вестник современных технологий» обязательна.

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64121 от 25.12.2015 г.
