



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ISSN: 2618-8201

**№ 2(10)
2018**

Вестник Современных Технологий

Сборник научных трудов

В сборнике печатаются материалы международной конференции
«Современные направления и перспективы развития технологий обработки
и оборудования в машиностроении» (10 – 14 сентября 2018 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-20074)

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

№ 2(10)
2018

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» (10 – 14 сентября 2018 года),
при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 18-08-20074)*

Севастополь 2018

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)
БЕРЕНГАРТЕН М. Г.	к. х. 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)
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)
ФАЛАЛЕЕВ А.П.	д. т. н., проф. (г. Симферополь)
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

Балашов А.В., Иконников А.М., Соломин Д.Е. Исследование стойкости режущего инструмента при гравировании	4
Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А., Рощупкин С.И. Синтез стохастического наблюдателя льюнбергера для оценивания состояния операции шлифования.....	9
Носенко В.А., Александров А.А. Распределения геометрических параметров зерен шлифовальных порошков	15
Абдулгазис Д. У., Умеров Э. Д., Абдулгазис У.А. Аспекты обеспечения качества операции сверления и защиты стержневого инструмента от перегрузок	21
Бурнашов М.А., Прежбилов А.Н. Исследование параметров струи при водолеяной очистке деталей машин.....	28
Галимов Д.М., Ардашев Д.В., Дьяконов А.А. Исследование характеристик твердого хромового покрытия на стальных деталях.....	32
Рязанцев А.Ю., Юхневич С.С. Использование комбинированных методов обработки для получения искусственной шероховатости на поверхностях деталей.....	39
Смирнов А.М., Терехов В.М. Изготовление глубоких отверстий для узлов крепления теплообменных труб	45
Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И. Влияние высокочастотной термоманитной обработки на электромагнитные свойства аморфных и поликристаллических материалов.....	50
Смирнов А.В., Пономарев С.Г., Васин А.А. Плотная упаковка полифракционных порошковых керамических материалов.....	55

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

CONTENTS

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)
BERENGARTEN M.G.	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)
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)
FALALEEV A.P.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
FEDONIN O.N.	D.Sc., Prof. (Bryansk)
YAKUBOV F.YA.	D.Sc., Prof. (Simferopol)
YAROSHENKO A.A.	D.Sc., Prof. (Sevastopol)

Balashov A.V., Ikonnikov A.M., Solomin D.E. Study of the resistance of the cutting tool in engraving.....	4
Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A., Roshchupkin S.I. Synthesis of lunberger stochastic observer for estimation of the state of the grinding operation	9
Nosenko V.A., Aleksandrov A.A. Distribution of geometric parameters of grinding powders.....	15
Abdulgasis DU, Umerov ED, Abdulgasis UA Aspects of quality assurance of the drill-rod operation and protection of the core tool from overloading.....	21
Burnashov M.A., Prezhbilov A.N. Investigation of jet parameters during water-ice cleaning of machine parts.....	28
Galimov D.M., Ardashev D.V., Dyakonov A.A. Research of characteristics of solid chromium coating on steel details	32
Ryazantsev A.Yu., Yukhnovich S.S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts' surfaces.....	39
Smirnov A.M., Terekhov V.M. Manufacture of deep holes for nodes fixing heat exchanger pipes.....	45
Dragoshanskii Yu.N., Pudov V.I. Influence of high-frequency thermomagnetic treatment on electromagnetic properties of amorphous and polycrystalline materials	50
Smirnov A.V., Ponomarev S.G., Vasin A.A. Dense packing of poly-fractional powder of ceramic materials.....	55

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 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ГРАВИРОВАНИИ

А.В. Балашов¹, А.М. Иконников¹, Д.Е. Соломин¹¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Российская Федерация

Аннотация

Целью данной статьи является показать, как влияет путь и условия резания на режущий инструмент при гравировании. Описаны этапы проведения эксперимента по изучению зависимости размерного износа режущего инструмента от пути резания. Выявлены зависимости размерного износа режущего инструмента от пути резания при гравировании без применения смазочно-охлаждающей жидкости и с применением смазочно-охлаждающей жидкости. Проведенные исследования износа твердосплавного инструмента представляют интерес для решения вопроса обрабатываемости резанием труднообрабатываемых буквенно-цифровых надписей на деталях машин и приборах.

Ключевые слова: размерный износ, путь резания, гравер, резание, эксперимент, гравирование.

STUDY OF THE RESISTANCE OF THE CUTTING TOOL IN ENGRAVING

A.V.Balashov¹, A.M. Ikonnikov¹, D.E. Solomin¹¹FSAEI HE Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Altai region Russian Federation

Abstract

The purpose of this article is to show how the path and cutting conditions affect the cutting tool during engraving. The stages of the experiment to study the dependence of the dimensional wear of the cutting tool on the cutting path are described. Dependences of dimensional wear of the cutting tool on the cutting path during engraving without the use of cutting fluid and with the use of cutting fluid are revealed. The conducted researches of wear of the carbide tool are of interest for the solution of a question of machinability by cutting of difficult-to-process alphanumeric inscriptions on details of cars and devices.

Keywords: dimensional wear, cutting way, engraver, cutting, experiment, engraving.

Введение

Размерный износ является одной из причин, вызывающих погрешности обработки. В любых условиях при резании наблюдается износ инструмента, который всегда приводит к изменению размеров обрабатываемого изделия.

Предельный износ инструмента приводит к необходимости его замены, что связано с перерывами в технологическом процессе. Однако задолго до полного затупления инструмента, когда он является еще вполне работоспособным, приходится в ряде случаев учитывать постоянный размерный износ инструмента и принимать специальные меры, для компенсации изменения размеров обрабатываемых деталей.

Описание исследований

Проведены поисковые эксперименты по гравированию полос длиной 50 мм, на заготовке из стали 45. Были проведены три серии экспериментов: 1 серия – без смазочно-охлаждающей жидкости; 2 серия – с применением эмульсии Blasocut 2000 Universal; 3 серия – с применением индустриального масла И40.

Гравирование производилось на фрезерно-гравировальном станке Lунх 3D-020, граверомиз твердого сплава, диаметром $D2 = 3,125$ мм, углом $A = 7,5^\circ$, размером $T = 0,1$ мм (рис. 1 и 2). Гравирование выполнялось с подачей, $S=5$ мм/мин, частотой вращения шпинделя, $n=24000$ мин⁻¹, глубиной резания $t=0,3$ мм.

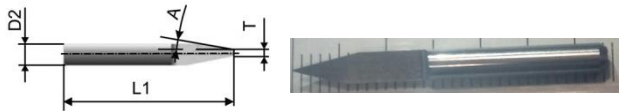


Рис 1.Гравер

Перед каждым проходом производили замер гравера на электронном микрометре МКЦ 25-50 мм. (рис. 4).



Рис. 2. Фрезерно-гравировальный станок Lynx 3D-020



Рис. 3. Измерение длины гравера на микрометре

Результаты и обсуждение

Первая серия экспериментов. Без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

Было произведено 4 полных прохода, длиной 50 мм и один длиной 2 мм, после которого произошла поломка гравера. Данные полученные в ходе проведения эксперимента занесены в таблицу 1.

Таблица 1.Размерный износ инструмента при гравировании без применения СОЖ

Номер прохода	Путь резания, мм	Длина гравера	Размерный износ, мм
0	0	31,86	0
1	50	31,845	0,015
2	100	31,827	0,033
3	150	31,815	0,045
4	200	31,807	0,053
5	202	Поломка гравера	

На основании полученных данных выявлена зависимость износа гравера от длины пройденного пути (рис. 4).

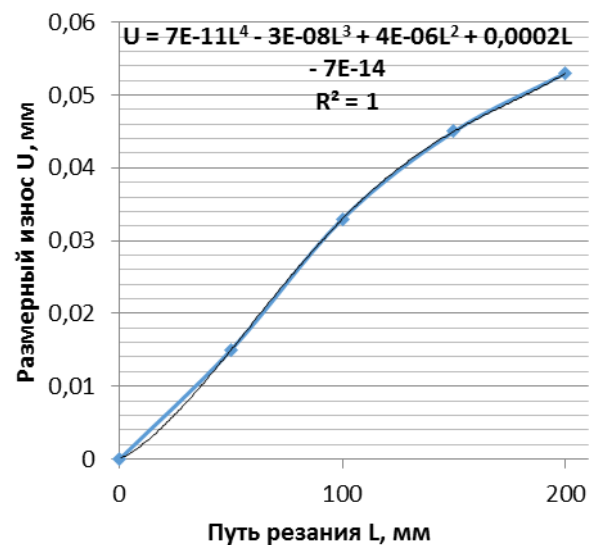


Рис.4. Зависимость износа гравера от пути резания

Вторая серия экспериментов. Гравирование со смазочно - охлаждающей жидкостью. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовалась эмульсия Blasocut 2000 Universal.

Было проведено 14 полных проходов длиной 50 мм и один неполный, длиной 21 мм, после которого произошла поломка

гравера. Результаты, полученные в ходе эксперимента приведены в табл. 2

Таблица 2. Размерный износ инструмента при гравировании с применением эмульсии Blasocut 2000 Universal

№ прохода	Путь резания, мм	Длина гравера, мм	Размерный износ, мм
1	2	3	4
0	0	31,403	0
1	50	31,39	0,013
2	100	31,386	0,017
3	150	31,382	0,021
4	200	31,38	0,023
5	250	31,374	0,029
6	300	31,37	0,033
7	350	31,365	0,038
8	400	31,364	0,039
9	450	31,363	0,04
10	500	31,363	0,04
11	550	31,363	0,04
12	600	31,36	0,043
13	650	31,358	0,045
14	700	31,357	0,046
15	721	Поломка гравера	

На основании полученных данных выявлена зависимость износа гравера от длины пройденного пути (рис. 5).

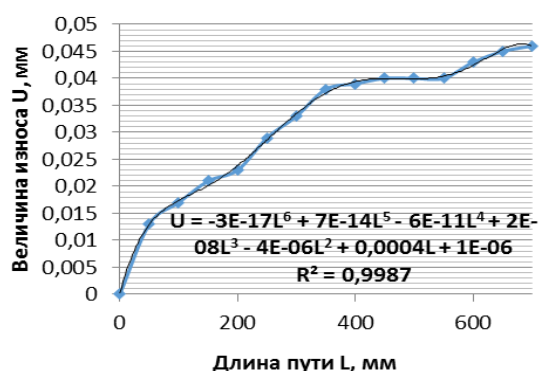


Рис. 5. Зависимость износа гравера от пути резания

Третья серия экспериментов. Гравирование со смазочно - охлаждающей жидкостью. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовалось масло индустриальное И40 (рис. 6).



Рис.6. Гравирование в масляной пленке

Было выполнено 23 прохода по 50 мм и один проход по 20 мм, после которого произошла поломка гравера. Данные о эксперименте представлены в таблице3.

Таблица 3.Размерный износ инструмента при гравировании в масляной ванне

№ прохода	Путь резания, мм	Длина гравера, мм	Размерный износ, мм
1	0	31,98	0
2	50	31,967	0,013
3	100	31,954	0,026
4	150	31,942	0,038
5	200	31,94	0,04
6	250	31,938	0,042
7	300	31,936	0,044
8	350	31,933	0,047
9	400	31,931	0,049
10	450	31,928	0,052
11	500	31,923	0,057
12	550	31,912	0,068
13	600	31,908	0,072
14	650	31,897	0,083
15	700	31,887	0,093
16	750	31,879	0,101
17	800	31,874	0,106
18	850	31,87	0,11
19	900	31,86	0,12
20	950	31,858	0,122
21	1000	31,853	0,127
22	1050	31,851	0,129
23	1100	31,837	0,143
24	1150	31,829	0,151
25	1170	Поломка гравера	

На основании полученных данных выявлена зависимость износа гравера от длины пройденного пути (рис. 6).

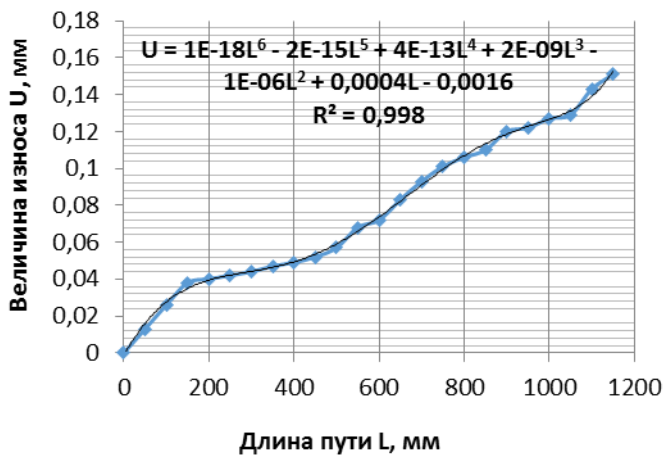


Рис. 6. Зависимость размерного износа гравера от пути резания

Анализ зависимости размерного износа гравера от пути резания показал, что на пути резания от 0 до 200 мм наблюдается участок приработки. Повышенный темп износа объясняется высоким начальным контактным давлением ввиду малой величины площади контакта. При увеличении площадки контакта темп износа уменьшается. Путь резания от 200 мм до 1000 мм соответствует периоду нормального износа, он характеризуется стабилизацией микрогеометрии инструмента. Путь резания от 1000 до 1170 мм характеризуется катастрофическим износом.

Выводы

1. Определена зависимость износа режущего инструмента от пути резания при гравировании стальной детали без применения смазочно-охлаждающей жидкости. Стойкость гравера составила 40,4 мин.
2. Определена зависимость износа режущего инструмента от пути резания при гравировании стальной детали с применения эмульсии Blasocut 2000 Universal. Стойкость гравера составила 144,2 мин.

3. Определена зависимость износа режущего инструмента от пути резания при гравировании стальной детали в масляной ванне. Стойкость гравера составила 234 мин.
4. Установлено, что гравирование в масляной ванне увеличивает стойкость гравера в 6 раз, относительно гравирования без СОЖ и в 2 раза, относительно гравированию с применением эмульсии Blasocut 2000 Universal
5. Проведенные исследования износа твердосплавного инструмента представляют интерес для решения вопроса обрабатываемости резанием труднообрабатываемых буквенно-цифровых надписей на деталях машин и приборах.

Список литературы

1. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1985, – 304 с, ил.
2. Барбашов Ф.А. Фрезерные работы: учеб. Пособие для сред. проф.-техн. уч-щ – М.: Высш. шк., 1986 – 208 с.: ил. – (Профтехобразование).
3. Улановский О.О. Ручное и машинное гравирование. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1990. – 208 с., ил.
4. Блюмберг В. А., Зазерский Е. И. Справочник фрезеровщика. — Л.: Машиностроение, 1984. – 288 с., ил
5. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: Справочник/В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский и др.; И.А. Ординарцев (пред) и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.: ил. – (Б-ка инструментальщика)
6. Высокопроизводительная обработка металлов резанием. М.: Издательство «Полиграфия», 2003. – 301 с.:ил.
7. Обработка металлов резанием: Справочник технолога [Текст] А.А. Панов, В.В. Аникин, Н.Г. Бойм и др.; Под общ. Ред. А.А. Панова. 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.: ил. – ISBN 5-94275-049-1
8. Миков И.Н., Морозов В.И. Технология автоматизированного гравирования художественных изображений. – М.: Издательство «Мир горной книги», 2007. – 346 с.: ил.

9. Режущий инструмент в производстве штампов и пресс-форм. Краткое справочное руководство. Третье издание. – ISCAR – 173.с.: ил.
10. Степнов М.Н. Статические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с., ил.

References

1. Granovsky G.I., Granovsky V. G. Cutting of metals: The textbook for машиностр. and приборостр. special higher education institutions. — М.: Vyssh. shk., 1985 — 304 with, silt.
2. Barbashov F.A. Milling works: studies. A grant for Wednesdays. the prof. – техн. uch-shch – М.: Vyssh. shk., 1986 – 208 pages: silt. – (Vocational training).
3. Ulanovsky O.O. Manual and machine engraving. – L.: Mechanical engineering. Leningrad office, 1990. – 208 pages, silt
4. Blyumberg V. A., Zazersky E. I. Reference book by the milling-machine operator. — L.: Mechanical engineering, 1984. — 288 pages, silt
5. Metalworking hard-alloy tool: Reference book / V.S. Samoylov, E.F. Eykhmans, V.A. Falkovsky,

- etc.; I.A. Ordinartsev (before), etc. – М.: Mechanical engineering, 1988. – 368 pages: silt. – (Toolmaker's B)
6. High-performance processing of metals cutting. М.: Poligrafiya publishing house, 2003. – 301 pages: silt.
7. Processing of metals cutting: Reference book by the technologist [Text] A.A. Panov, V.V. Anikin, N.G. Boym, etc.; Under a general Edition of A.A. Panov. 2nd prod., reslave. And additional – М.: Mechanical engineering, 2004. – 784 pages: silt. – ISBN 5-94275-049-1
8. Mikov I.N., Morozov V.I. Technology of the automated engraving of art images. – М.: World of the Mountain Book publishing house, 2007. – 346 pages: silt.
9. The cutting tool in production of stamps and compression molds. Short reference guide. Third edition. – ISCAR – 173.s.: silt.
10. Stepnov M.N. Static methods of processing of results of mechanical tests: Reference book. – М.: Mechanical engineering, 1985. – 232 pages, silt.

УДК 621.923:621.90.17

СИНТЕЗ СТОХАСТИЧЕСКОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ ЛЬЮНБЕРГЕРА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ

С.М. Братан¹, А.О. Харченко¹, Е.А. Владецкая¹, С.И. Рощупкин¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается методика построения стохастического наблюдателя Льюнбергера для операции круглого наружного шлифования, позволяющая получать оптимальные оценки выходных параметров технологической системы. Для построения стохастического наблюдателя Льюнбергера разработана программа, позволяющая решать уравнения Риккати объекта и фильтра. Выполнен расчет коэффициентов фильтра Калмана-Бюсси для стационарного режима процесса шлифования шейки распределительного вала. 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 Льюнбергера, фильтр Калмана-Бюсси, уравнения Риккати, дисперсия оценок.

SYNTHESIS OF LUNBERGER STOCHASTIC OBSERVER FOR ESTIMATION OF THE STATE OF THE GRINDING OPERATION

S.M. Bratan¹, A.O. Kharchenko¹, E.A. Vladetskaya¹, S.I. Roshchupkin¹¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract

The technique of constructing Lunberger stochastic observer for the operation of circular external grinding is considered in the article, which makes it possible to obtain optimal estimates of the output parameters of the technological system. To build Lunberger stochastic observer, a program has been developed that allows solving the Riccati equation of the object and the filter. The calculation of the Kalman-Bucy filter coefficients for the steady-state mode of the process of grinding the camshaft journal is performed. This allows us to evaluate 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, Lunberger stochastic observer, Kalman-Bucy filter, Riccati equation, variance of estimates.

Решение задач оптимального управления операциями шлифования предполагает возможность точного измерения всех переменных состояния объекта и наличие полной априорной информации о параметрах технологической системы [1-2].

Анализ операции шлифования показывает, что необходимые для управления объектом фазовые координаты измеряются с существенными случайными ошибками или не измеряются вообще [4-7]. При этом движение объекта управления подвержено случайным воздействиям. Поэтому при реше-

нии задач управления применение детерминированных методов неприемлемо[3]. В такой ситуации необходимо иметь результаты оценивания состояния технологической системы, которые имеют статистическую связь с данными наблюдений. Динамика операции шлифования описывается дифференциальным уравнением вида:

$$c\ddot{S}_y - a\dot{S}_y = -c\ddot{Q}_\Sigma + b\dot{Q}_\Sigma + \dot{y}_T, \quad (1)$$

где $\dot{S}_y$ – величина подачи; $\dot{Q}_\Sigma$ – интенсивность съема материала; $\dot{y}_T$ – интенсивность температурных деформаций в технологической системе; a , b и c – коэффициенты, учитывающие податливость технологической системы.

Для решения задачи синтеза линейного алгоритма оценивания (фильтрации), формирующего несмещенную оценку вектора состояния системы с минимальной дисперсией представим дифференциальное уравнение (1) в векторно-матричном виде [8-11].

Учитывая, что выражение (1) является дифференциальным уравнением второго порядка, используем для понижения его порядка стандартную процедуру.

Обозначим

$$x_1 = Q_\Sigma, \quad \dot{x}_1 = x_2 = \dot{Q}_\Sigma, \quad \dot{y}_T = w, \quad \text{тогда}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{b}{c}x_2 + \frac{w}{c} + u, \quad \text{где } u = -\ddot{S}_y + \frac{a}{c}S_y.$$

Учитывая, что при шлифовании изделий наблюдению и обработке доступна величина съема материала $Q_\Sigma = x_1$, система уравнений, описывающая состояние объекта, представляется в виде:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{b(t)}{c(t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} -a(t) - b(t)c(t) \\ a^2(t) + a(t)b(t)c(t) \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{c(t)} \end{bmatrix} w(t), \quad (2) \\ y(t) = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + v(t) \end{cases}$$

где $\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ – вектор состояния системы; $u(t)$ –

вектор управления; $u(t) = \begin{bmatrix} \dot{S}_y(t) \\ \ddot{S}_y(t) \end{bmatrix}$; $w(t)$ –

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

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{b(t)}{c(t)} \end{bmatrix}; \quad B(t) = \begin{bmatrix} -a(t) - b(t)c(t) \\ a^2(t) + a(t)b(t)c(t) \end{bmatrix};$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{c(t)} \end{bmatrix}; \quad H(t) = [1 \ 0],$$

соответствующие им матрицы.

Графическая интерпретация системы (2) представлена на (рис 1).

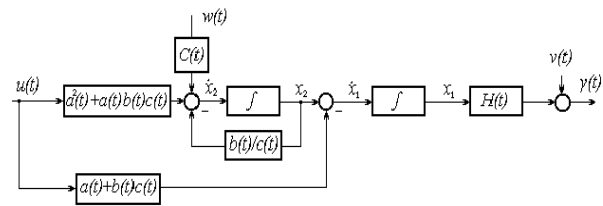


Рис. 1. Структурная схема системы, заданная в пространстве состояний

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 $x(t_0)$ есть случайный гауссовский вектор с известным математическим ожиданием $M[x(t_0)] = \bar{x}_0$ и корреляционной матрицей

$$\begin{aligned} \text{cov}[x(t_0), \bar{x}(t_0)] &= \\ &= M \left\{ [x(t_0) - \bar{x}(t_0)] [x(t_0) - \bar{x}(t_0)]^T \right\} = \\ &= P(t_0, t) = P_0, \end{aligned}$$

а также то, что начальное состояние системы (2), случайные воздействия и погрешности измерений при всех $t \geq t_0$ взаимно некоррелированы:

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

найдем линейную несмещенную оценку вектора $x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, построенную на основе результатов наблюдений $y(\tau)$, ($t_0 \leq \tau \leq t$).

Обозначим эту оценку через $z(t) = \hat{x}(t)$. Такая оценка может быть получена на выходе фильтра, описываемого векторным дифференциальным уравнением [1]:

$$\dot{z}(t) = F(t)z(t) + G(t)u(t) + K(t)y(t) \quad (3)$$

с ошибкой оценивания

$$e(t) = x(t) - z(t). \quad (4)$$

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

$$M[\hat{x}(t)] = M[x(t)] = \bar{x}(t). \quad (5)$$

Вычисляя математическое ожидание обеих частей уравнения (4), получим:

$$\begin{aligned} M[\dot{z}(t)] &= F(t)M[z(t)] + \\ &+ G(t)u(t) + K(t)M[y(t)]. \end{aligned}$$

Тогда, учитывая, что $M[y(t)] = H(t)M[x(t)]$, на основании (5) дифференциальное уравнение для среднего

значения вектора состояния системы запишется:

$$\dot{\bar{x}}(t) = [F(t) + K(t)H(t)]\bar{x}(t) + G(t)u(t). \quad (6)$$

После вычисления математического ожидания от обеих частей уравнения (2) получим уравнение для среднего значения вектора состояния технологической системы $\dot{\bar{x}} = A(t)x(t) + B(t)u(t)$ или

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{b(t)}{c(t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} -a(t) - b(t)c(t) \\ a^2(t) + a(t)b(t)c(t) \end{bmatrix} u(t) \end{aligned} \quad (7)$$

Сравнивая (6) и (7), запишем первое условие несмещенности оценки вектора состояния с помощью рассматриваемого фильтра:

$$F(t) = A(t) - K(t)H(t); \quad G(t) = B(t) \quad (8)$$

Второе условие состоит в том, чтобы уравнения (5) и (6) решались при одном и том же начальном условии:

$$\bar{x}_0 = M[\hat{x}(t_0)] = M[x(t_0)] = \bar{x}_0. \quad (9)$$

Если выполнить условия несмещенности (8) и (9), то уравнение фильтра (3) примет вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{b(t)}{c(t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} -a(t) - b(t)c(t) \\ a^2(t) + a(t)b(t)c(t) \end{bmatrix} u(t) + \\ &+ \begin{bmatrix} K_1(t) \\ K_2(t) \end{bmatrix} \left(y(t) - \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$z_0 = \bar{x}_0$$

Графическая интерпретация наблюдаемой системы и фильтра представлена на (рис. 2).

В выражении (10) 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 [1]:

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

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 $P(t)$:

$$P(t_0) = M\{[x(t_0) - \bar{x}_0][x(t_0) - \bar{x}_0]^T\} \quad (11)$$

и $z(t_0) = x_0$, то согласно (10) $P(t_0) = P_0$.

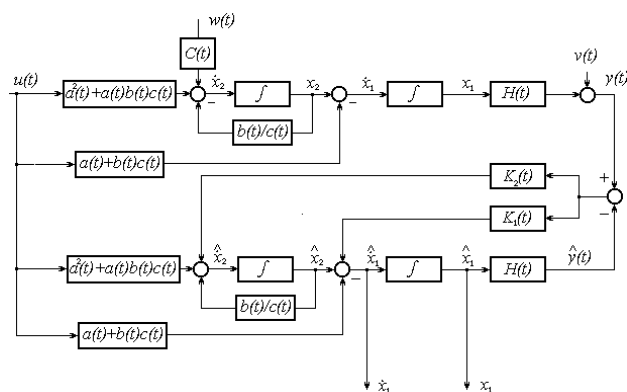


Рис. 2. Структурная схема стохастической системы с наблюдателем Льюнбергера с фильтром Калмана-Бюсси

Корреляционная матрица ошибок является решением матричного дифференциального уравнения Риккати [1]:

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

которое следует решать при начальных условиях (11). При шлифовании изделий для каждого конкретного режима матрицы A , B , C и H являются постоянными, при чем матрицы $Q = M[W(t)W^T(\tau)] = D[W]$ и

$R = M[V(t)V^T(\tau)] = D[V]$, описывающие статистические характеристики изменения температуры и шероховатости поверхности, являются скалярными величинами, поэтому технологическая система, определяемая уравнениями (2), является стационарной (рис. 3).

Для такой системы уравнение фильтра Калмана-Бюсси принимает вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{b}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a-bc \\ a^2+abc \end{bmatrix} u(t) + \\ & + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \left(y - \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} \right) \\ z_0 = & \bar{x}_0 \end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{b}{c} \end{bmatrix} P + \hat{P} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & \frac{b}{c} \end{bmatrix} - \\ & - \hat{P} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} D^{-1}(V) \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \hat{P} + \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{c} \end{bmatrix} D(W) \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} = 0 \end{aligned}$$

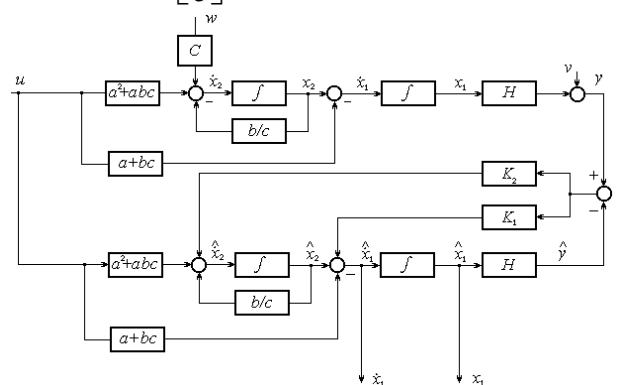


Рис. 3. Структурная схема стационарной системы с фильтром Калмана-Бюсси

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

$$\begin{aligned} \dot{P} = & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{b}{c} \end{bmatrix} P + P \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & \frac{b}{c} \end{bmatrix} - \\ & - P \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} D^{-1}(V) \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} P + \\ & + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{c} \end{bmatrix} D(W) \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

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

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

Для построения фильтра Калмана-Бюсси 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: $G_k=0,244 \cdot 10^3$ Нс/м; $C_{шк}=35 \cdot 10^6$ Н/м; $C_u=18 \cdot 10^6$ Н/м; $C_k=11,89 \cdot 10^6$ Н/м; $\alpha=4 \cdot 10^{-6}$; $\dot{S}_y=5 \cdot 10^{-6}$ м/с, $Q=D_W=4 \cdot 10^{-12}$ м/с, $R=D_V=0,36 \cdot 10^{-12}$, где статистические данные по интенсивности тепловых деформаций Q и величине слоя, в котором распределена шероховатость R взяты из работ [5,12].

В результате выполнения программы получили численные данные, характеризующие качество работы фильтра (рис. 4).

Анализ результатов вычислений показывает, что установившееся состояние фильтра наступает через 0,4 с (соответствует одному обороту детали) с готовностью к практическому использованию. Это позволяет оценивать состояние системы в реальном масштабе времени, причем даже в случае измерения лишь одной координаты Q_Σ фильтр дает оценки всех координат, а мак-

симальные ошибки оценивания не превышают 10%.

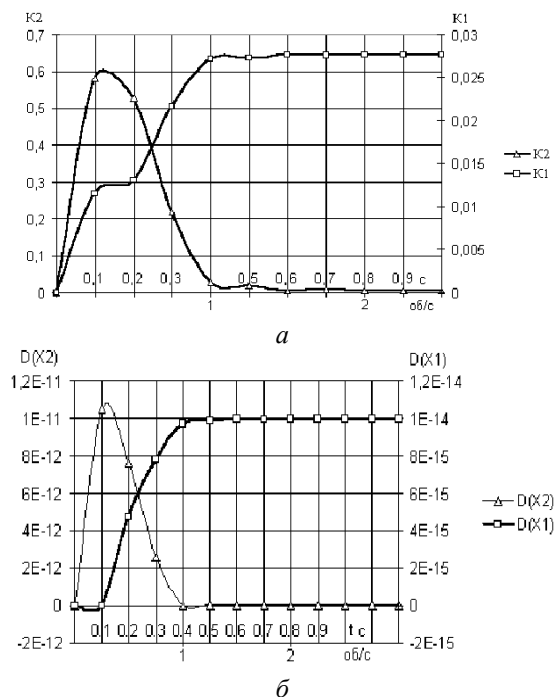


Рис. 4. Графики зависимостей коэффициентов усиления фильтра от времени (а) и дисперсии оценок от времени (б)

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Деруссо П. Пространство состояний в теории управления / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. 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.
8. 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.
9. 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 – Przeclaw, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
10. 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.
11. Братан С.М. Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, // Наукоемкие технологии в машиностроении.– Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2016. №9 (63). – С. 10-15.
12. 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. Lobanov D.V., Ianiushkin A.S., Arkhipov P.V. Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie tverdospлавnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii // Vektor nauki Tol'iatinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 3-1 (33-1). S. 85-91.
2. Lobanov D.V., Muliukhin N.V. Metodika prognozirovaniia povrezhdenosti tverdogo splava pri zatachivanii instrumenta dlia obrabotki nemetallicheskich kompozitov // Aktual'nye problemy v mashinostroyenii. 2018. T. 5. №1-2. S. 78-84.1.
3. Derusso P. Prostranstvo sostoyaniy v teorii upravleniya / P. Derusso, R. Roy, CH. Klouz. – M.: Nauka, 1970. – 620 s.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Vladeckaya E.A. Obespechenie kachestva shlifoval'noj obrabotki putem umen'sheniya vneshnih vozmushheniy v usloviyakh plavuchey masterskoj / E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckij // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii.– Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314). – S.88-103.
8. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego fil'tra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchey remontnoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopriladobuduvannya ta transport; zб. nauk. pr. – Sevastopol': Vid-vo SevNTU, 2014. – S. 36-40.
9. Harchenko A.O. Povyshenie tochnosti processa kruglogo shlifovaniya putem ehffektivnoy vibroizolyacii stanka / A. Harchenko, S. Bratan, E. Vladeckaya // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08». – Rzeszow – Przeclaw, Polska, 24-27 Wrzesein, 2008. – P. 47-58.
10. Harchenko A.O. Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyj signal na primere stanka v usloviyakh plavuchey masterskoj / A. Harchenko, E. Vladeckaya, V.Dolgin, S. Bratan // Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Mashiny i proizvodstvennye processy).– Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015.– S. 86-98.
11. 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.
12. 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 621.921.27:620.186.82

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРЕН ШЛИФОВАЛЬНЫХ ПОРОШКОВ

В.А. Носенко¹, А.А.Александров¹¹ ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация

Исследованы законы распределения геометрических параметров зерен шлифовальных порошков карбида кремния черного производства Волжского абразивного завода. Зернистость порошков F36-F180. Каждая зернистость рассеяна на фракции по ГОСТ 52381. Длину, ширину, периметр, площадь, приведенный диаметр зерен измеряли методом оптической микроскопии, эквивалентный диаметр – методом лазерной дифракции. Из геометрических параметров получены коэффициенты формы: изометричность, округлость и прямоугольность. Установлено, что ширина и приведенный диаметр подчиняется нормальному закону распределения; длина, периметр, площадь зерен и эквивалентный диаметр – логарифмически нормальному закону; коэффициенты изометричности, округлости и прямоугольности зерен – закону бета-распределения.

Ключевые слова: шлифовальные порошки, фракции, геометрические параметры, коэффициенты формы, законы распределения.

DISTRIBUTION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF GRINDING POWDERS

V.A. Nosenko¹, A.A.Aleksandrov¹¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

Abstract

The distribution laws of geometrical parameters of grains of grinding powders of silicon carbide of black manufacture of the Volzhsky abrasive plant are investigated. Grits of powders are F36-F180. Each grit is sieved into fractions in accordance with State Standard 52381. The length, width, projection perimeter, projection area and projection diameter of the grains are measured by optical microscopy. Volume equivalent diameter is measured by the laser diffraction method. From geometric parameters, the shape factors are obtained: isometry, roundness, and rectangularity. It was established that the width and projection diameter of most fractions obeys the normal distribution law; length, perimeter, grain area and equivalent diameter mostly correspond to the lognormal distribution law. The factors of isometry, roundness and rectangularity of grains in most samples obey the beta distribution.

Keywords: distribution laws, grinding powders, fractions, geometric parameters, shape factors.

Геометрические параметры шлифовальных порошков во многом определяют эксплуатационные показатели абразивного инструмента, в частности, режущую способность, износостойкость, силу резания, температуру в зоне контакта и качество обработанной поверхности. Поэтому исследование формы и размера зерен абразивных материалов относится к числу актуальных задач теории абразивной обработки [1-4].

Известно, что размеры зерен шлифовальных порошков даже в пределах одной зернистости имеют значительный вариационный размах. Например, ширина зерен

шлифовальных порошков из карбида кремния черного зернистостей F36 и F90 изменяется соответственно в диапазонах 407...764 мкм и 130...226 мкм [5-7]. Однако закономерности изменения формы зерен шлифовальных порошков с учетом их размеров изучены недостаточно.

Из геометрических параметров зерен в наибольшей степени исследована ширина зерен, в меньшей степени длина и их соотношение для зернистости [8] или отдельных фракций [9, 10]. Приведены параметры распределения ширины зерен из электрокорунда белого, нормального и карбида кремния зеленого зернистостей 80-16 (ГОСТ 3647-

80), не рассеянных на фракции [11]. Но имеющиеся данные разнородны, что затрудняет их обобщение в рамках единой математической модели распределения геометрических размеров зерен шлифовальных порошков. Данные о периметре и площади проекции зерен практически отсутствуют.

Подавляющее большинство исследований выполнены в период действия на зерновой состав шлифовальных порошков ГОСТ 3647-80. Действующий в настоящее время ГОСТ Р 52381 отличается дюймовой шкалой классификации и размерами контрольных сит, что затрудняет использование ранее полученных данных о геометрических размерах зерен.

В связи с этим, цель данной работы заключалась в исследовании распределений геометрических параметров шлифовальных порошков в соответствии с ГОСТ Р 52381.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: шлифовальные порошки рассеяны на фракции и дана оценка гранулометрического состава на соответствие действующему стандарту; с использованием различных методов измерений определены геометрические параметры зерен и исследованы законы их распределения.

Исследования проведены на шлифовальных порошках из карбида кремния черного зернистостей F36-F180 производства ОАО «Волжский абразивный завод». В каждой из 34 полученных фракций объем выборки измерений составлял от 600 до 1000 зерен. Определяли следующие геометрические параметры: ширина b , длина l , периметр P , площадь S , приведенный диаметр d и эквивалентный диаметр D .

Параметры b , l , P , S измеряли на оптических микроскопах Altami CM0870-T и МБС-9 с использованием программного обеспечения «Зерно-НМ» (свидетельство № 2011610144 от 11.01.11). Приведенный диаметр d определяли как диаметр окружности, площадь которой эквивалентна площади проекции зерна. На основе полученных данных рассчитывали коэффициенты формы зерен: изометричность $k_1=b/l$, округлость $k_2=(4\pi S)/P^2$ и прямоугольность $k_3=S/(lb)$.

Методом лазерной дифракции на приборе Mastersizer-3000 определяли эквивалентный диаметр зерен D , равный диаметру шара, объем которого эквивалентен объему зерна. Самые мелкие фракции зернистостей данным методом не анализировали, ввиду недостаточного количества зерен в пробах.

Гипотезу о принадлежности геометрических размеров зерен к закону распределения проверяли по критерию Пирсона на уровне значимости 0,05. При расчете критерия Пирсона для параметра D объем выборки, исходя из минимального количества измерений зерен на лазерных анализаторах используемого типа, принимали равным 20000.

По внешнему виду графики плотности распределения b (рис. 1) приближаются к симметричным колоколообразным кривым, что свидетельствует о возможности их распределения по нормальному закону.

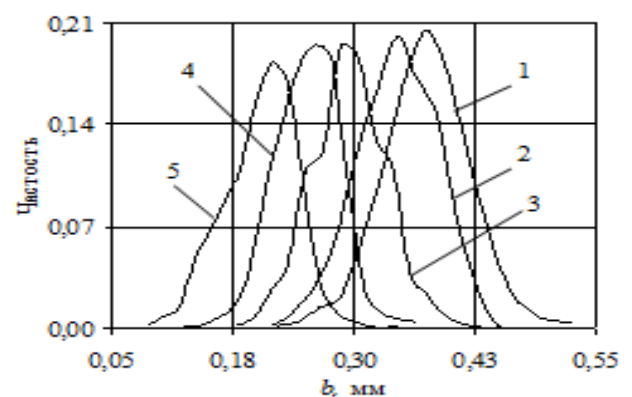


Рис. 1. Плотность распределения b фракций шлифовальных порошков 1 – Q₂; 2 – Q₃; 3 – Q₄; 4 – Q₅; 5 – Q₆ зернистости F60

Установлено, что распределение ширины зерен в 32 фракциях из 34 подчиняются нормальному закону распределения. Не соответствует нормальному закону ширина зерен самых мелких фракций зернистостей F46 и F60.

Одной из возможных причин несоответствия самой мелкой фракции Q₆ нормальному закону распределения является отличие условий формирования. Согласно ГОСТ Р 52381, распределение зерен шлифовальных порошков по фракциям происходит в результате отсева через контрольные сита. Фракции Q₂-Q₅ образуются в результате рас-

сева через верхнее сито и оседают на нижнем. Верхнее сито можно рассматривать, как проходной калибр, нижнее – не проходной. Самая мелкая фракция Q_6 оседает на поддоне.

Согласно ГОСТ Р 52381, массовая доля фракции Q_6 не должна быть более 3%. В рассматриваемых примерах доля данной фракции не превышала 1%.

Исходя из этого принято допущение о распределении ширины зерен по нормальному закону, параметрами которого являются выборочное среднее арифметическое и выборочная дисперсия.

Для кривых распределения l (рис. 2) характерна удлиненная правая ветвь, свидетельствующая о положительной асимметрии распределения. Для большинства фракций, кроме самой крупной Q_2 и самой мелкой Q_6 , коэффициент асимметрии 0,5-1,9. Распределение l фракции Q_2 имеет еще более выраженную положительную асимметрию (коэффициент асимметрии 1,1-2,5). Во фракции Q_6 , в связи с особенностями её формирования возможно образование двухвершинного распределения параметра l .

В результате проверки по критерию Пирсона установлено, что из 34 фракций нормальному закону распределения параметр l подчиняется в четырех, из которых две фракции Q_6 . Логарифмически нормальному закону подчиняется распределение l во фракциях Q_3 - Q_5 , не подчиняется – во всех фракциях Q_2 . Необходимо отметить и особенности формирования фракции Q_2 . Согласно ГОСТ Р 52381, рассев осуществляется на 6 фракций. Фракция Q_1 формируется на первом сите, и массовая доля этой фракции должна быть равна нулю. Это означает, что фракция Q_2 должна гарантированно не содержать крупных зерен. Очевидно, что данный фактор оказывает влияние на распределение длины зерна.

Периметр и площадь зерен зависят от длины и ширины зерна. Но на распределение параметров, большее влияние оказывает длина зерна. Согласно полученным данным, почти в 80 % фракций распределение P и S подчиняются логарифмически нормальному закону распределения (рис. 3 и 4).

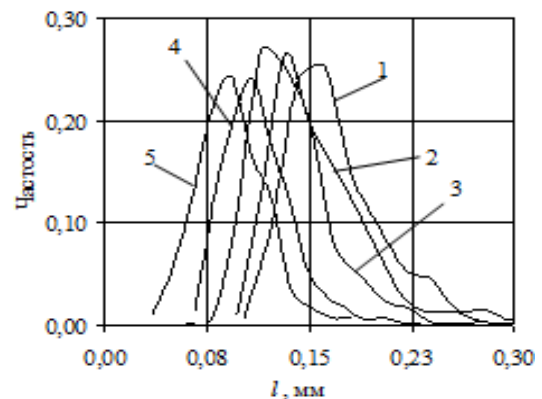


Рис. 2. Плотность распределения l фракций шлифовальных порошков 1 – Q_2 ; 2 – Q_3 ; 3 – Q_4 ; 4 – Q_5 ; 5 – Q_6 зернистости F180

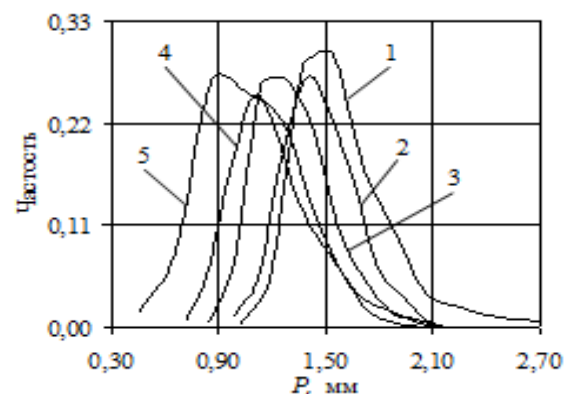


Рис. 3. Плотность распределения P фракций шлифовальных порошков 1 – Q_2 ; 2 – Q_3 ; 3 – Q_4 ; 4 – Q_5 ; 5 – Q_6 зернистости F60

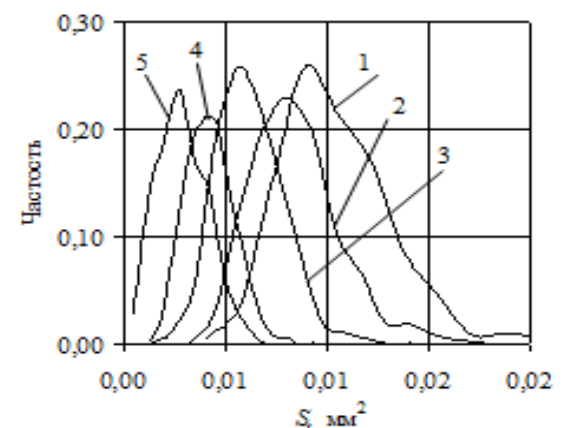


Рис. 4. Плотность распределения S фракций шлифовальных порошков 1 – Q_2 ; 2 – Q_3 ; 3 – Q_4 ; 4 – Q_5 ; 5 – Q_6 зернистости F180

Приведенный диаметр d получали из площади S зерна: $d = 2\sqrt{S/\pi}$. В результате

такого преобразования графики распределения d представляют колоколообразные кривые (рис. 5). Нормальному закону распределения подчиняется d зерен в 80% выборок.

Эквивалентный диаметр D , в отличие от рассмотренных ранее параметров, получают методом лазерной дифракции. Данный метод представляет зерно в виде сферы, объем которой эквивалентен объему зерна. Если принять плотность зерен постоянной, этот параметр характеризует средний размер сферы с эквивалентной массой.

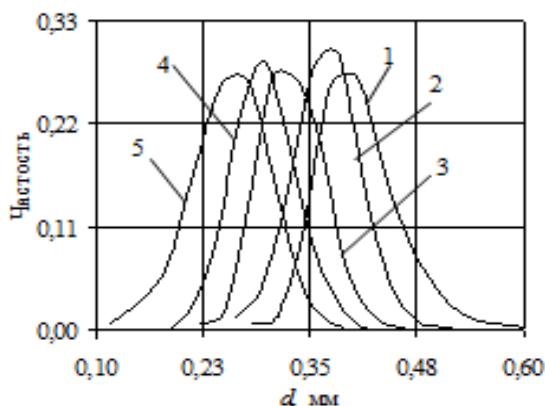


Рис. 5. Плотность распределения d фракций шлифовальных порошков 1 – Q_2 ; 2 – Q_3 ; 3 – Q_4 ; 4 – Q_5 ; 5 – Q_6 зернистости F60

Распределение D (рис. 6) проверяли на принадлежность к нормальному и логарифмически нормальному законам распределения. Установлено, что для принятого объема выборки в количестве 20000 зерен расчетные значения критерия Пирсона превышают табличные.

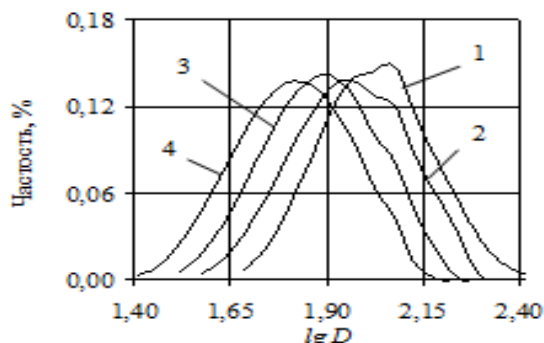


Рис. 6. Плотность распределения D фракций шлифовальных порошков 1 – Q_2 ; 2 – Q_3 ; 3 – Q_4 ; 4 – Q_5 зернистости F180

С целью выравнивания объемов выборки количество измерений параметра D при определении критерия Пирсона снижено до 1000. Получили, что все 20 выборок D подчиняются логарифмически нормальному закону.

Распределения параметров формы k_1 , k_2 и k_3 в большинстве выборок являются несимметричными, с левой полой ветвью (рис. 7, 8, 9).

Согласно расчетным формулам, коэффициенты формы k_1 , k_2 и k_3 для любого зерна ограничены с двух сторон и располагаются в интервале (0; 1), что является предпосылкой для проверки гипотезы о бета-распределении данных параметров [12].

Теоретическое бета-распределение имеет параметр формы α и параметр масштаба β [12]:

$$M(x) = \frac{\alpha + 1}{\alpha + \beta + 2}$$

$$D(x) = \frac{(\alpha + 1)(\beta + 1)}{(\alpha + \beta + 2)^2(\alpha + \beta + 3)},$$

где $M(x)$ – среднее выборочное и $D(x)$ – выборочная дисперсия.

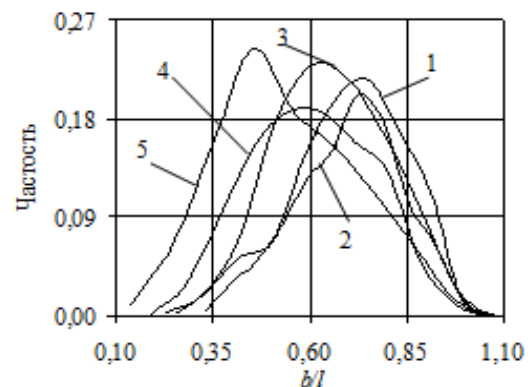


Рис. 7. Плотность распределения k_1 фракций шлифовальных порошков 1 – Q_2 ; 2 – Q_3 ; 3 – Q_4 ; 4 – Q_5 ; 5 – Q_6 зернистости F60

Установлено, что параметр k_1 в 80, k_2 – в 90 и k_3 – в 95% фракций соответствуют бета-распределению. В наибольшей степени не подчиняются данному распределению фракции Q_6 рассматриваемых зернистостей, а также 2 фракции Q_2 .

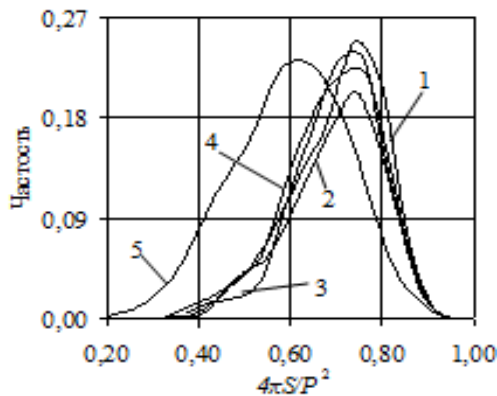


Рис. 8. Плотность распределения k_2 фракций шлифовальных порошков 1 – Q2; 2 – Q3; 3 – Q4; 4 – Q5; 5 – Q6 зернистости F60

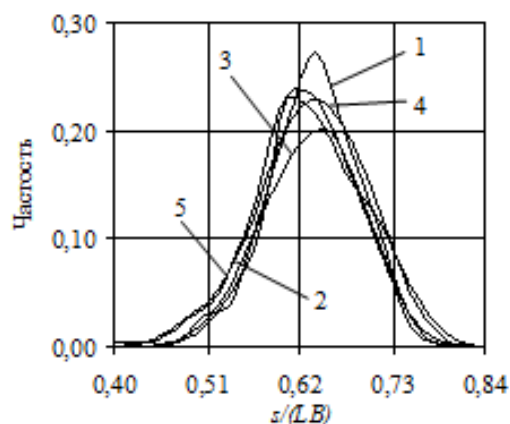


Рис. 9. Плотность распределения k_3 фракций шлифовальных порошков 1 – Q2; 2 – Q3; 3 – Q4; 4 – Q5; 5 – Q6 зернистости F60

Выводы

Таким образом, при исследовании геометрических параметров зерен шлифпорошков карбида кремния черного зернистостей F36-F180 производства Волжского абразивного завода установлено, что распределение параметра d в 80% фракций и b в 95% фракций подчиняется нормальному закону; распределение параметров l во фракциях Q3-Q5, P и S в 80% фракций и D во всех фракциях – логарифмически нормальному закону; распределение коэффициентов формы k_1 , k_2 и k_3 подчиняется закону бета-распределения в 80, 90 и 95% фракций, соответственно.

Список литературы

1. Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. К.: Наукова думка. – 1978. – 207 с.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. д-ра техн. наук проф. А. Н. Резникова. М. – Машиностроение. – 1977. – 391 с.
3. Jia D.W. et al. Identification and measurement of superabrasive shapes // International journal of computer applications in technology, 2007, V. 29, №2-4, P. 137-140.
4. Katha Babu M. Studies on recharging of abrasives in abrasive water jet machining / M. Katha Babu, O.V. Krishnaiah Chetty // International Journal of Manufacturing Technology, 2002, №19, P. 697-703.
5. Носенко В.А. Зависимость среднего и дисперсии ширины зёрен шлифовальных порошков карбида кремния чёрного от размера ячейки проходного сита / В.А. Носенко, А.А. Александров // Вестник Брянского гос. техн. ун-та, 2016. № 5 (53). С. 8–15.
6. Носенко В.А. Распределения ширины зёрен шлифовальных порошков из карбида кремния чёрного различных зернистостей / В.А. Носенко, А.А. Александров // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2015. - № 2. - С. 111-117.
7. Носенко В.А. Геометрические параметры зёрен шлифовального порошка карбида кремния чёрного 54CF60 производства Волжского абразивного завода / В.А. Носенко, А.А. Александров, Е.Ф. Ганшу // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 3. – С. 9.
8. Кошин А.А. Исследование гранулометрического состава и микрогеометрических показателей абразивных зёрен шлифовальных кругов, применяемых в обдирочном шлифовании. / А.А. Кошин, А.В. Сопельцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2010. – № 10 (186). –С. 77-82.
9. Gomez V.A.O. Effect of abrasive particle size distribution on the wear rate and wear mode in micro-scale abrasive wear tests / V.A.O Gomez et al. // Wear, 2015. – V. 328-329. – P. 563-568.
10. Мгеладзе В.Ф. Зависимость среднего объема единичного зерна основной фракции от размера ячейки задерживающего сита / В.Ф. Мгеладзе, И.В. Лавров // Абразивы. – 1971. - №1. – С. 1-4.
11. Лавров И.В. Закономерность распределения зерен в шлифзерне, шлиф- и микропорошках по крупности / И.В. Лавров, Т.Б. Лобода // Абразивы, 1973, №12, С. 8-15.
12. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 816 с.

References

1. Bajkalov A.K. Vvedenie v teoriju shlifovanija materialov. K.: Naukova dumka. – 1978. – 207 s.
2. Abrazivnaja i almaznaja obrabotka materialov. Spravochnik. Pod red. d-ra tehn. nauk prof. A. N. Reznikova. M. – Mashinostroenie. – 1977. – 391 s.
3. Jia D.W. et al. Identification and measurement of superabrasive shapes // International journal of computer applications in technology, 2007, V. 29, №2-4, P. 137-140.
4. Katha Babu M. Studies on recharging of abrasives in abrasive water jet machining / M. Katha Babu, O.V. Krishnaiah Chetty // International Journal of Manufacturing Technology, 2002, №19, P. 697-703.
5. Nosenko V.A. Zavisimost' srednego i dispersii shiriny zjoren shlifoval'nyh poroshkov karbida kremnija chjornogo ot razmera jachejki prohodnogo sita / V.A. Nosenko, A.A. Aleksandrov // Vestnik Brjanskogo gos. tehn. un-ta, 2016. № 5 (53). С. 8–15.
6. Nosenko V.A. Raspredelenija shiriny zjoren shlifoval'nyh poroshkov iz karbida kremnija chjornogo razlichnyh zernistostej / V.A. Nosenko, A.A. Aleksandrov // Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. - 2015. - № 2. - С. 111-117.
7. Nosenko V.A. Geometricheskie parametry zjoren shlifoval'nogo poroshka karbida kremnija chjornogo 54CF60 proizvodstva Volzhskogo abrazivnogo zavoda / V.A. Nosenko, A.A. Aleksandrov, E.F. Ganshu // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. - 2014. - № 3. – S. 9.
8. Koshin A.A. Issledovanie granulometricheskogo sostava i mikrogeometricheskikh pokazatelej abrazivnyh zjoren shlifoval'nyh krugov, primenjaemyh v obdirochnom shlifovanii. / A.A. Koshin, A.V. Sopol'cev // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Mashinostroenie. – 2010. – № 10 (186). –S. 77-82.
9. Gomez V.A.O. Effect of abrasive particle size distribution on the wear rate and wear mode in micro-scale abrasive wear tests / V.A.O Gomez et al. // Wear, 2015. – V. 328-329. – P. 563-568.
10. Mgeladze V.F. Zavisimost' srednego obzema edinichnogo zerna osnovnoj frakcii ot razmera jachejki zaderzhivajushhego sita / V.F. Mgeladze, I.V. Lavrov // Abrazivy. – 1971. - №1. – S. 1-4.
11. Lavrov I.V. Zakonomernost' raspredelenija zeren v shlifzerne, shlif- i mikroporoshkah po krupnosti / I.V. Lavrov, T.B. Loboda // Abrazivy, 1973, №12, S. 8-15.
12. Kobzar' A. I. Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. - M.: FIZMATLIT, 2006. - 816 s.

УДК 621.914.02

АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОПЕРАЦИИ СВЕРЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ СТЕРЖНЕВОГО ИНСТРУМЕНТА ОТ ПЕРЕГРУЗОК

Д.У. Абдулгазис¹, Э.Д. Умеров¹, У.А. Абдулгазис¹¹Крымский инженерно-педагогический университет, г. Симферополь, Российская Федерация

Аннотация

В статье, с учетом специфики операции сверления, в особенности глубокого, выполнен анализ известных математических моделей, описывающих аспекты обеспечения точности и качества получения отверстий. По результатам анализа известных математических моделей сделано заключение о том, что имеющиеся зависимости охватывают только часть проблемы повышения точности, выдержки формы отверстия и качества ее поверхности. Показана целесообразность разработки математических моделей более широко охватывающих технологические системы сверления отверстий, в особенности в труднообрабатываемых материалах. Приведен пример работы системы стабилизации нагрузки на сверло, где коррекция регулируемых величин осуществляется по текущей глубине сверления.

Ключевые слова: качество обработки, процесс сверления, стержневой инструмент, математические модели, силы резания, увод свела, колебательная система, защита от перегрузок.

ASPECTS OF PROVIDING THE QUALITY OF THE OPERATION OF DRILLING AND PROTECTION OF THE TOOLS FROM OVERLOADS

D.U. Abdulgasis¹, E.D. Umerov¹, D.A. Abdulgasis¹¹Krymsky Engineering and Pedagogical University, Simferopol, Russian Federation

Abstract

In the article, taking into account the specifics of the drilling operation, especially deep drilling, an analysis of known mathematical models describing the aspects of ensuring the accuracy and quality of holes is performed. Based on the results of analysis of known mathematical models, it was concluded that the available dependencies cover only part of the problem of increasing accuracy, holding the shape of the hole and the quality of its surface. The expediency of development of mathematical models more widely covering technological systems of drilling of holes, in particular in hard-to-process materials is shown. An example of the system of stabilizing the load on a drill is given, where correction of the adjustable values is carried out at the current drilling depth.

Keywords: quality of processing, drilling process, core tool, mathematical models, cutting forces, withdrawal led, oscillatory system, overload protection.

Введение

Повышение точности обработки и стойкости инструмента в процессе сверления достигается путем создания и использования точных математических моделей процесса сверления, с учетом специфики явлений, протекающих в зоне обработки и упругих деформаций технологической системы.

Специфика операции сверления, в особенности глубокого, заключается в том, что инструмент прокладывает себе путь в сплошном материале, не имея жесткого

направления. Процесс усугубляется еще и неоднородностью качества обрабатываемого материала. К тому же стружкообразование протекает в условиях сложного стружкоудаления.

Чем больше глубина сверления, тем тяжелее условия работы сверла. Это усугубляется еще и спецификой подачи свежей СОТС в зону резания при сверлении, а также несоизмеримо большим, чем при токарной обработке временем соприкосновения стружки с инструментом и обрабатываемой

заготовкой, и как следствие значительным ростом температуры в зоне резания. С увеличением глубины обработки имеет место скопление стружки в стружкоотводящих каналах, что способствует росту силовых параметров процесса.

Вибрация инструмента ведет к формированию огранки отверстия, а специфичный характер износа направляющих сверла вызывает образование конусности и повышенной шероховатости поверхности. Царапины на стенках получаемого отверстия являются как правило следствием накопления и пакетирования стружки в стружкоотводящих каналах сверла. Выкрашивание режущих кромок и направляющих, заклинивание частиц стружки между формируемым отверстием и направляющими сверла создают задиры на поверхности формирования отверстия.

Производственный и исследовательский опыт показывает, что несмотря на большое количество разработок по оптимизации режимов резания, совершенствованию инструмента и СОТС, устранить нарастание силовой нагрузки на сверло в процессе его заглубления не удастся.

Изложенное выше указывает на целесообразность создания систем управления процессом сверления с целью повышения качества обработки отверстий и повышения стойкости стержневого инструмента.

Цель статьи – анализ математических моделей технологического процесса сверления отверстий, для того чтобы усовершенствовать методы защиты стержневого инструмента от перегрузок и совершенствования управления качеством обработки.

Методика исследований

Решение задачи повышения качества обработки и защиты инструмента от перегрузок с целью повышения его стойкости, может быть осуществимо использованием методов совершенствования технологических характеристик станков и инструмента, подаваемой СОТС, а также управлением режимами резания.

Определяющее влияние на точность получаемого диаметрального размера, геомет-

рическую форму отверстия в продольном и поперечном направлениях, точность направления оси отверстия и параметры шероховатости получаемых поверхностей при сверлении оказывают:

- значительные адгезионные связи между инструментом и стружкой;
- неравномерная твердость материала заготовки;
- несимметричность заточки лезвий сверла;
- несимметричный износ лезвий сверла.

Большой вылет сверла в сочетании с малым его диаметром способствует возникновению еще и радиальных составляющих сил резания.

Результаты и их обсуждение

Проанализируем математические модели процесса сверления описывающих разные аспекты обеспечения качества получения отверстий.

В работе [1] предложен расчетно-аналитический метод определения погрешности, приобретаемой деталью в результате обработки. Суть метода заключается в определении и суммировании отдельных составляющих погрешности. Он учитывает ниже следующие систематические погрешности: геометрическую неточность станка (Δ_1); износ режущего инструмента (Δ_2); тепловые деформации технологической системы (Δ_3); упругие деформации технологической системы (Δ_4); неточность настройки станка (Δ_5); случайные погрешности, зависящие от неравномерной твердости обрабатываемой заготовки ($\Delta_{сл 1}$); погрешности измерений ($\Delta_{сл 2}$).

Таким образом, суммарную погрешность можно представить как:

$$\Delta_{сумм} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_{сл 1} + \Delta_{сл 2} \quad (1)$$

В единичном и мелкосерийном производстве, вынужденно берутся во внимание только систематические погрешности.

Выражение (1) определяет погрешность размера обрабатываемой поверхности, а для того, чтобы оценить погрешность геометрии

ческой формы, необходимо определить разность полученных соответствующих размеров детали с размерами по чертежу.

В выражении (1) упругие деформации, вызванные нежесткостью инструмента (в нашем случае это сверло, являющееся наименее жестким из всего перечня лезвийного инструмента), входят в составляющую Δ_4 , учитывающую упругие деформации технологической системы.

В работе [2] влияние радиальной составляющей силы резания на упругую линию инструмента представлено выражением

$$y = \frac{F_p}{3EJ}(x-l)^3, \quad (2)$$

где F_p – радиальная сила, действующая на сверло; E – модуль упругости материала сверла; J – момент инерции поперечного сечения сверла; x – координата поперечного сечения; l – длина рабочей части сверла.

Начальное смещение оси сверла в той же работе [2] предложено определять из уравнения

$$e = \frac{F_p l^3}{3EJ}, \quad (3)$$

а величину угла наклона оси у его вершины из уравнения

$$\varphi_l = \frac{F_p l^2}{2EJ}, \quad (4)$$

Величину увода сверла к моменту завершения процесса сверления предложено [2] определять как

$$y_k = (e_y + e) + (\operatorname{tg} \alpha_y + \operatorname{tg} \varphi) \cdot L \quad (5)$$

где e_y – величина смещения сверления от центра заготовки; α_y – угловая погрешность из-за неверной установки базы заготовки относительно оси шпинделя станка.

Считают [2], что погрешности e_y и α_y относительно невелики и устранимы в наладочном процессе.

Второй и четвертый члены уравнения (5) показывают соответственно начальное смещение (l) и угловую погрешность оси отверстия при врезании сверла.

В работе [3], по результатам обширного анализа причин увода при глубоком сверле-

нии, величину увода оси в любом поперечном сечении в результате неоднородности материала заготовки предложено определять из зависимости

$$Y_{ci} = \sqrt{y_i^2 - z_i^2}, \quad (6)$$

где y_i и z_i – составляющие увода, определяемые зависимостями

$$y = y_0 + l_c \operatorname{tg} \alpha_y + \int_0^l B_y dx, \quad (7)$$

$$z = z_0 + l_c \operatorname{tg} \alpha_z + \int_0^l B_z dz. \quad (8)$$

В зависимостях (7) и (8) принято:

y_0 и z_0 – координаты входа инструмента в заготовку; α_y и α_z – угловые погрешности при врезании инструмента в заготовку; B_y и B_z – безразмерные функции, определяющие поперечные отклонения сверла под влиянием разнотвердости материала заготовки.

Приведенные модели не учитывают упругие свойства технологической системы, оказывающие существенное влияние на точность обработки и силовые параметры.

В работе [4] задача управления станочной системой при сверлении глубоких отверстий ставилась с целью оптимизации заглублений. Модель станочной системы представлена следующим образом.

$$\frac{dx}{dt} = a\vec{x} + b\vec{f} + c\vec{u}, \quad (9)$$

где $\vec{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}^T$ – вектор состояния управляемой системы; $\vec{f}$ – вектор внешних возмущений; $\vec{u}$ – вектор управления; a, b, c – матрицы постоянных коэффициентов.

Ряд исследований [5-8] направлены на установление причин зарождения и развития колебаний сравнительно небольшой амплитуды, сопровождающих процессы обработки резанием. Характер колебаний при механической обработке концевым инструментом считают зависящим от числа и расположения режущих кромок, длины инструмента, формы его поперечного сечения, режима резания, состава подаваемой СОТС, однородности обрабатываемого материала.

В работе [8] математическая модель колебательной системы рассмотрена в виде дифференциального уравнения:

$$M\ddot{x} = j\dot{x} + F_f, \quad (10)$$

где M – приведенная масса системы; j – жесткость системы; F_f – сила подачи.

Рассматривая уравнение (10) применительно к сверлению, можно констатировать, что она не учитывает возможных радиальных сил, неизбежных для этого процесса. Последние, как известно, существенно определяют точность обработки и качество поверхностей полученных отверстий. В работе [2] избыточная неуравновешенная радиальная составляющая оценивается как оказывающая доминирующее влияние на геометрическую форму создаваемого отверстия.

Дифференциальное уравнение движения под действием упругой реакции инструмента в работе [8] представлено в виде:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + F = F_p, \quad (11)$$

где F – упругая реакция инструмента; m – приведенная масса; F_p – проекция радиальной силы; c – коэффициент демпфирования.

Математические модели накопленных уводов спиральных сверл по длине отверстия в работе [9] представлены в виде

$$\begin{aligned} y(x) &= (x / x_0)^{1,5} \\ z(x) &= \frac{q}{120EJ} x^4 + \\ &+ \left(z_0 x_0^{-1,5} - \frac{q}{120EJ} x^{2,5} \right) x^{1,5} \end{aligned}, \quad (12)$$

где x – вылет сверла из патрона; $y(x)$, $z(x)$ – проекции вектора увода $r(x)$ на горизонтальную и вертикальную плоскости; z_0 – линейные погрешности в первоначальном направлении сверла в вертикальной плоскости; x_0 – расстояние от места крепления сверла до заготовки; q – распределенная нагрузка от массы сверла; s – площадь сечения сверла; EJ – изгибная жесткость сверла.

Далее рассмотрим имеющиеся мехатронные конструктивные разработки по защите стержневого инструмента (сверл) от

перегрузок, с целью повышения его стойкости.

Основными силовыми параметрами процесса сверления, определяющими условия работы инструмента, являются осевая сила и крутящий момент прикладываемые к сверлу.

Ограничение по прочности сверла [9,10] записано в идее

$$\sigma_{\text{экв}} < [\sigma], \quad (13)$$

при условии, что

$$\sigma_{\text{экв}} < a (c M - F_f), \quad (14)$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ – максимальное значение эквивалентного напряжения, возникающего от совместного действия осевой силы и крутящего момента прикладываемых к сверлу; $[\sigma]$ – предельное значение разрушающего напряжения; a и c – коэффициенты подбираемые в зависимости от используемого материала сверла; F_f – осевая составляющая силы резания;

Ограничение по прочности можно выразить более упрощенно

$$M < [M]. \quad (15)$$

Поскольку при достижении некоторой величины заглубления ограничение осевой силы утрачивает существенную значимость. Доминирующим становится крутящий момент, который и необходимо стабилизировать с помощью системы управления процессом сверления.

Ряд исследований [9-11] показал, что ограничение по крутящему моменту особенно важно на начальном этапе операции сверления, когда свободная часть стержня сверла еще достаточно большая. Выполнение такого ограничения на начальном этапе не позволяет развиваться неисправимому уводу сверла.

В работе [12] предложен вариант системы автоматического управления (САУ) содержащий два контура: управление по осевой силе и управление по крутящему моменту. Коррекция регулируемых величин осуществляется в предложенной системе по текущей глубине сверления. На (рис.1) приведена схема этой системы по [13].

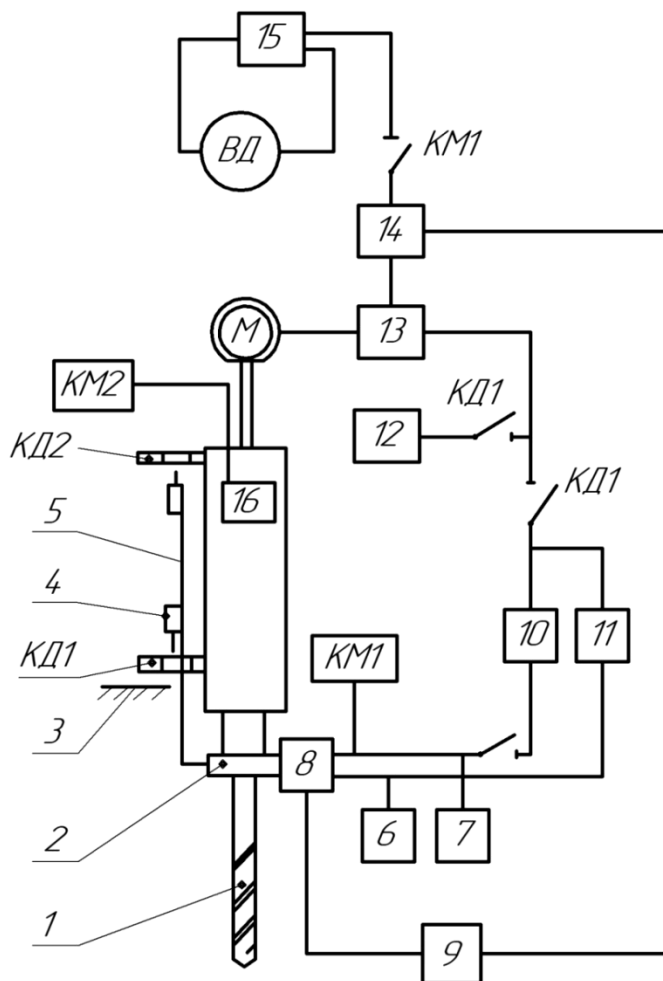


Рис. 1. Схема системы стабилизации нагрузки на сверло:

1 – сверло; 2 – патрон; 3 – упор; 4 – подвижная шторка; 5 – направляющая; 6 и 7 – датчики осевой силы и крутящего момента; 8 – измерительный блок осевой силы и крутящего момента; 9 – пороговый элемент; 10 и 11 – регуляторы; 12 – датчик скорости быстрого подвода и реверса; 13 – система управления приводом; 14 – логический блок; 15 – пороговый элемент; 16 – датчик перемещения

Инструмент до соприкосновения сверла с заготовкой подводится на быстрой подаче, скорость которой определяется датчиком 12. Установленная на нужном положении подвижная шторка 4 перекрывает светодиод датчика КД1 и происходит переключение на рабочую подачу.

В случае недопустимого снижения скорости осевой подачи сверла срабатывает пороговый элемент 15, при этом на выходе логического блока 14 подается сигнал на промежуточный отвод сверла для его охлаждения и принудительного удаления стружки.

Измерительный блок 8, подключенный через элемент 9 к логическому блоку 14 определяет максимально допустимый крутящий момент, прикладываемый к сверлу. В случае возникновения резких перегрузок сверла по крутящему моменту элемент 14 подает сигнал на его промежуточный отвод.

Датчик перемещений по мере роста глубины сверления меняет силу сигнала, на величину которого реагирует релейный элемент КМ2.

Оценивая весомость двух силовых факторов, с определенной глубины сверления, происходит переключение с контура управления по осевой силе на управление по крутящему моменту.

Шторка 4 перемещается в процессе отвода сверла на быстрой подаче (отводе) вместе с направляющей 5. При выходе режущих кромок сверла из отверстия срабатывает датчик КД2, реверс инструмента прекращается и сверло на быстрой подаче возвращается к месту окончания предыдущего сверления. Перед врезанием сверла происходит переключение трансмиссии станка на скорость рабочей подачи.

Конструктивных схем устройств для защиты сверла от перегрузок много, например, авторские свидетельства [14-19].

Выводы

1. Приведенный выше анализ известных математических моделей показывает, что имеющиеся зависимости охватывают только часть проблемы повышения точности, выдержки формы отверстия и качества ее поверхности. Целесообразна разработка математических моделей, более широко охватывающих технологические системы сверления отверстий, в особенности в труднообрабатываемых материалах, с учетом особенностей подачи СОТС и их состава.

2. Имеется ряд разработок по стабилизации нагрузки на сверло с высоким быстродействием определяющих режим перегрузки инструмента и позволяющих регулировать подачу.

Список литературы

- Соколовский А.П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках / А.П. Соколовский. – М.: Машгиз, 1952. – 288 с.
- Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий / Ю.П. Холмогорцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.
- Троицкий Н.Д. Глубокое сверление / Н.Д. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
- Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.И. Кижняев, С.К. Плужников, А.А. Шаманин, Ф.М. Дроздов / Под общ. ред. Н.Ф. Уткина. – Л.: машиностроение, 1988. – 269 с.
- Житомирский В.К. Механические колебания и практика их устранения / В.К. Житомирский. – М.: Машинотроение, 1966. – 175 с.
- Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.
- Кумабе Д. Вибрационное резание / Д. Кумабе. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
- Мурашкин Л.С. Прикладная нелинейная механика станков / Л.С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.
- Назаренко Д.В. Оптимизация процесса сверления глубоких отверстий малого диаметра. Автореф. дисс. на соик. канд.техн. наук. Ростов-на-Дону: Донской госуд. техн. университет. – 1998. – 18 с.
- Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208с.
- Самоподнастраивающиеся станки / Под. ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1970. – 414с.
- Левченко А.И. Система управления параметрами нагрузки при глубоком сверлении / А.И. Левченко // Материалы 3-й международной научн.-техн. конф. «Автомобильный транспорт: прогресс, технологии, кадры» – Севастополь: Изд-во СевГТУ. – 1999. – С.202-204.
- Левченко А.И. Стабилизация силовых переменных режима при обработке отверстий / А.И. Левченко // TOOLS 2000: Proc. of the Int. Conf. – Bratislava, 2000 – Pr. 176-178.
- А.с. 1154062 А СССР, МКИ В 23 В 47/24. Устройство для защиты стержневого инструмента / Шаров Е.Т., Тараненко В.А., Канареев Ф.Н. – заявлено 13.02.84; опубл. 07.05.85, Бюл. №17.
- А.с. 1155421 А СССР, МКИ В 23 В 49/00. Способ защиты инструмента от перегрузок и устройство для его реализации / Шаров Е.Т., Тараненко В.А. – заявлено 13.01.84; опубл. 15.05.85, Бюл. №18.
- А.с. 1255299 А СССР, МКИ В 23 В 49/00. Устройство для контроля положения инструмента / Шаров Е.Т., Тараненко В.А., Канареев Ф.Н. – заявлено 16.04.85; опубл. 07.09.86, Бюл. №33.
- А.с. 1269973 А1 СССР, МКИ В 23 Q 15/00. Устройство для защиты инструмента / Шаров Е.Т., Тараненко В.А. – заявлено 26.04.84; опубл. 15.11.86, Бюл. №42.
- А.с. 1271676 А1 СССР, МКИ В 23 В 49/00. Устройство для защиты концевой инструмента / Шаров Е.Т., Тараненко В.А. – заявлено 05.05.85; опубл. 23.11.86, Бюл. №43.
- А.с. 1414523 А1 СССР, МКИ В 23 В 49/00. Устройство для контроля перегрузки и поломки стержневого инструмента / Шаров Е.Т., Тараненко В.А., Страшко В.Н. – заявлено 19.01.87; опубл. 07.08.88, Бюл. №29.

References

- Sokolovskij A.P. Raschety tochnosti obrabotki na metallovezhushchih stankah / A.P. Sokolovskij. – M.: Mashgiz, 1952. – 288 s.
- Holmogorcev Yu.P. Optimizaciya processov obrabotki otverstij / Yu.P. Holmogorcev. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 184 s.
- Troickij N.D. Glubokoe sverlenie / N.D. Troickij. – L.: Mashinostroenie, 1982. – 208 s.
- Obrabotka glubokih otverstij / N.F. Utkin, Yu.I. Kizhnyaev, S.K. Pluzhnikov, A.A. Shamanin, F.M. Drozdov / Pod obshch. red. N.F. Utkina. – L.: mashinostroenie, 1988. – 269 s.
- Zhitomirskij V.K. Mekhanicheskie kolebaniya i praktika ih ustraneniya / V.K. Zhitomirskij. – M.: Mashinostroenie, 1966. – 175 s.
- Kedrov S.S. Kolebaniya metallovezhushchih stankov / S.S. Kedrov. – M.: Mashinostroenie, 1978. – 199 s.
- Kumabe D. Vibracionnoe rezanie / D. Kumabe. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 224 s.
- Murashkin L.S. Prikladnaya nelinejnaya mekhanika stankov / L.S. Murashkin, S.L. Murashkin. – L.: Mashinostroenie, 1977. – 192 s.
- Nazarenko D.V. Optimizaciya processa sverleniya glubokih otverstij malogo diametra. Avto-ref. diss. na soik. kand.tekhn. nauk. Rostov-na-Donu: Donskoj gosud. tekhn. universitet. – 1998. – 18 s.
- Tverskoj M.M. Avtomaticheskoe upravlenie rezhimami obrabotki detalej na stankah / M.M. Tverskoj. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 208s.
- Samopodnastraivayushchiesya stanki / Pod. red. B.S. Balakshina. – M.: Mashinostroenie, 1970. – 414s.
- Levchenko A.I. Sistema upravleniya parametrami nagruzki pri glubokom sverlenii / A.I. Levchenko // Materialy 3-j mezhdunarodnoj nauchn.-tekhn. konf. «Avtomobil'nyj transport: pro-gress, tekhnologii, kadry» – Sevastopol': Izd-vo SevGTU. – 1999. – S.202-204.
- Levchenko A.I. Stabilizaciya silovyh peremen-nyh rezhima pri obrabotke otverstij / A.I. Levchenko // TOOLS 2000: Proc. of the Int. Conf. – Bratislava, 2000 – Pr. 176-178.

-
14. A.s. 1154062 A SSSR, MKI V 23 V 47/24. Ustrojstvo dlya zashchity sterzhnogo instrumen-ta / Sharov E.T., Taranenko V.A., Kanareev F.N. – zayavleno 13.02.84; opubl. 07.05.85, Byul. №17.
 15. A.s. 1155421 A SSSR, MKI V 23 V 49/00. Spo-sob zashchity instrumenta ot peregruzok i ustrojstvo dlya ego realizacii / Sharov E.T., Taranenko V.A. – zayavleno 13.01.84; opubl. 15.05.85, Byul. №18.
 16. A.s. 1255299 A SSSR, MKI V 23 V 49/00. Ustrojstvo dlya kontrolya polozheniya instrumen-ta / Sharov E.T., Taranenko V.A., Kanareev F.N. – zayavleno 16.04.85; opubl. 07.09.86, Byul. №33.
 17. A.s. 1269973 A1 SSSR, MKI V 23 Q 15/00. Ustrojstvo dlya zashchity instrumenta / Sharov E.T., Taranenko V.A. – zayavleno 26.04.84; opubl. 15.11.86, Byul. №42.
 18. A.s. 1271676 A1 SSSR, MKI V 23 V 49/00. Ustrojstvo dlya zashchity koncevogo instrumenta / Sharov E.T., Taranenko V.A. – zayavleno 05.05.85; opubl. 23.11.86, Byul. №43.
 19. A.s. 1414523 A1 SSSR, MKI V 23 V 49/00. Ustrojstvo dlya kontrolya peregruzki i polomki sterzhnogo instrumenta / Sharov E.T., Taranenko V.A., Strashko V.N. – zayavleno 19.01.87; opubl. 07.08.88, Byul. №29.

УДК 621.924.93

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ ПРИ ВОДОЛЕДЯНОЙ ОЧИСТКЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

М.А. Бурнашов¹, А.Н. Прежбилов¹¹ ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел, Российская Федерация

Аннотация

В статье рассматривается технология применения способа очистки поверхностей деталей автомобилей высоконапорной водоледяной струей с заранее подготовленными частицами льда. Так же исследуются параметры водоледяной струи, являющейся «рабочим инструментом» данного метода. Приведены результаты эмпирического определения зависимости длины активного участка струи от геометрических параметров струеформирующей насадки и физических параметров рабочей жидкости.

Ключевые слова: гидроструйные технологии, очистка деталей, гидроледяная технология, активный участок струи, водоледяная струя.

INVESTIGATION OF JET PARAMETERS DURING WATER-ICE CLEANING OF MACHINE PARTS

M.A. Burnashov¹, A.N. Prezhbilov¹¹Orel State University of I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation

Abstract

The technology of application of the method for cleaning surfaces of car parts with a high-pressure water-cooled jet with pre-prepared ice particles is considered in the article. The parameters of the water-ice jet, which is the "working tool" of this method, are also studied. The results of the empirical determination of the dependence of the length of the active part of the jet on the geometric parameters of the jet forming nozzle and the physical parameters of the working fluid are given.

Keywords: hydrojet technologies, cleaning of parts, hydro-ice technology, active part of the jet, water-jet.

Во время эксплуатации автомобилей поверхности их деталей покрываются различными видами загрязнений, имеющих разный состав и свойства. Данные загрязнения ухудшают эксплуатационные характеристики, увеличивают износ, снижают срок службы деталей и узлов, приводят к поломкам.

При проведении ремонта загрязнения снижают производительность труда, ухудшают точность контроля и дефектации деталей, снижают качество ремонта и ресурс отремонтированных деталей и узлов.

Удаление загрязнений с наружных и внутренних поверхностей деталей автомобилей – процесс весьма трудоемкий и дорогостоящий.

Наиболее полное представление о виде встречающихся загрязнений поверхностей дает классификация, предложенная профессором Н. Ф. Тельновым [1], которая условно разделяет загрязнения по происхождению, физико-химическим свойствам и специфике их удаления при очистке поверхностей.

По химическому составу загрязнения ремонтируемых автотранспортных средств можно разделить на:

органические (жировые, масляные отложения, пленки лакокрасочных покрытий, остатки консервационных смазок);

неорганические (загрязнения из окружающей среды, продукты окисления);

смешанные (нагары, лаки, консистентные смазки, производственные загрязнения).

Загрязнения от остатков топливно-смазочных материалов (ТСМ) и продуктов их трансформации являются наиболее распространенными. При работе автомобилей смазочные материалы значительно изменяются, что обусловлено процессами «старения» — окисления и полимеризации. Чаще всего это:

- продукты неполного сгорания топлива,
- продукты окисления,
- продукты деструкции углеводородов,
- продукты полимеризации,
- продукты конденсации и коагуляции углеводородных и гетероорганических соединений,
- продукты коррозии и биоповреждения металлов в среде ТСМ.

С целью обобщения, загрязнение деталей можно представить как смесь твердых мелких частиц с полимеризованными остатками масел и жиров [2]. Удаление такого покрытия является ресурсоемким процессом.

Среди известных методов очистки наиболее универсальными и перспективными являются струйные способы.

Водолеяная очистка является не только экологически чистым методом, но и экономичным.

Частицы льда, обладая свойствами твердых частиц, при разгоне до высоких скоростей позволяют удалять многие загрязнения, не повреждая основания очищаемой поверхности. Использование при очистке водяного льда существенно упрощает регенерацию очищающей среды [3].

Для широкого внедрения технологии водолеяной очистки поверхностей деталей необходимо как на теоретическом так и на эмпирическом уровнях исследовать свойства и параметры водолеяной струи.

Анализ литературных источников, содержащих информацию об исследованиях и практике применения водолеяных струй, позволил сформулировать основные факторы и показатели, определяющие и характеризующие процесс водолеяной очистки [4-8]. Их можно объединить в четыре группы:

- гидравлические: давление воды P_0 перед струеформирующей насадкой, диаметр d_0 струеформирующей насадки (опреде-

ляет расход воды высокого давления Q_0), скорость истечения воды из насадки V_0 ;

- геометрические: длина l_{kc} и диаметр d_{kc} камеры смешивания, диаметр d_k и длина коллиматора l_k ; диаметр дроссельной шайбы системы подачи частиц льда d_A (определяет массовый расход частиц льда Q_A);
- режимные: скорость V_n перемещения инструмента относительно материала, геометрические размеры частиц льда, концентрация частиц льда в водолеяной струе c , расстояние l_0 между срезом коллиматора и поверхностью материала;
- механические свойства материала.

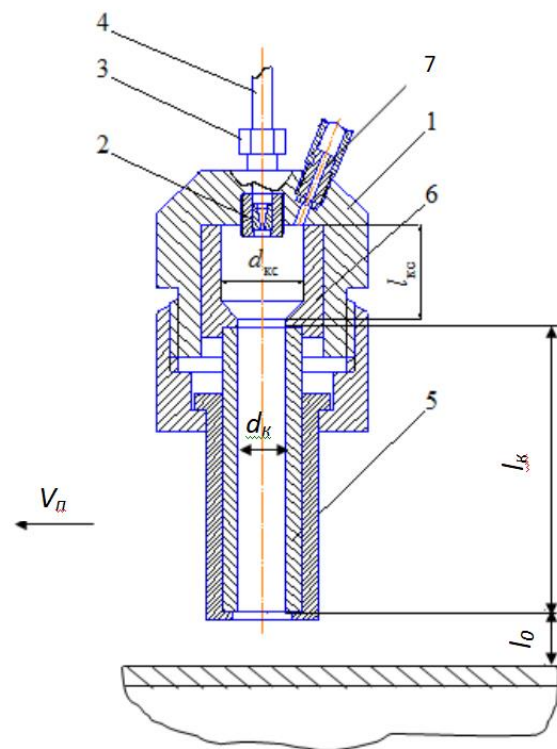


Рис. 1. Схема инструмента для водолеяной очистки

Схема инструмента для водолеяной очистки принципиально аналогична схеме инструмента для гидроабразивного резания или очистки (рис. 1). В корпусе инструмента 1 закреплена водяная струеформирующая насадка 2, через которую, через штуцер 3, по трубопроводу 4 подаётся вода высокого давления. Струя воды высокого давления, вырываясь из струеформирующей насадки, проходит через камеру смешивания 6 и коллиматор 5. При прохождении водяной струи

через камеру смешивания 6 происходит увлечение ледяных частиц из канала 7 через дроссельную шайбу, регулирующую их расход. В коллиматоре происходит окончательное формирование водолеяной струи.

Для изучения структуры водолеяной струи, а также процесса водолеяной очистки были проведены экспериментальные исследования на специальном стенде, состоящем из следующих основных узлов: насосный блок высокого давления мультипликаторного типа 1, гидроструйный инструмент 2, подвижный стол с кронштейнами для крепления образцов 3 (рис. 2). Насосный блок 1 позволял обеспечивать давление воды до 100 МПа и расход её до 30 л/мин. Испытуемые образцы с различными физико-механическими свойствами крепились на подвижном столе 3 при помощи специальных кронштейнов. Подвижный стол приводился в движение благодаря приводу, представляющему собой электродвигатель с тиристорным преобразователем и винтовым податчиком. Подача подготовленных частиц льда осуществлялась к гидроструйному инструменту по гибким магистралям 4. Для регистрации давления использовались стрелочные манометры первого класса точности, установленные на выходе из насосного блока.



Рис. 2. Экспериментальный стенд

Проводились исследования направленные на изучение структуры струи, или, иначе говоря, на установление влияния различных параметров на длину участка струи, который выполняет основную технологическую операцию – очистку с наибольшей производительностью. Такой участок в структуре струи имеет название «активный участок» - $l_{a,y}$.

В качестве метода для изучения структуры водолеяной струи использовался, получивший положительную практику метод фиксации следов прохождения струи по чувствительной к механическому воздействию поверхности. При этом на поверхности отчетливо видны отпечатки от прохождения струи с твердыми частицами (в нашем случае ледяными) либо сплошной водяной струи. Длиной активного участка считается максимальное расстояние от среза коллиматора до обрабатываемой поверхности, при котором наблюдаются следы воздействия на поверхность твердых частиц. В экспериментах использовались образцы, представляющие собой жесткую металлическую подложку, обладающую твердостью НВ 241...248 с полированной поверхностью и трехслойным покрытием. Первый слой покрытия, прилегающий непосредственно к полированной поверхности, это считывающий слой. Промежуточный слой – это слой красящей одно-сторонней пленки, при механическом воздействии на которую часть красящего состава переносилась на первый слой. Наружный слой – это гидроизолирующее покрытие. При прохождении струи по поверхности образца на первом – считывающем слое оставались следы от воздействия разрозненных жидкости и твердых частиц, в зависимости от параметров процесса.

Исследования проводились при изменении давления воды P_0 от 30 до 60 МПа, при скорости перемещения образцов $V_n=1$ м/с. Результаты представлены на (рис. 3).

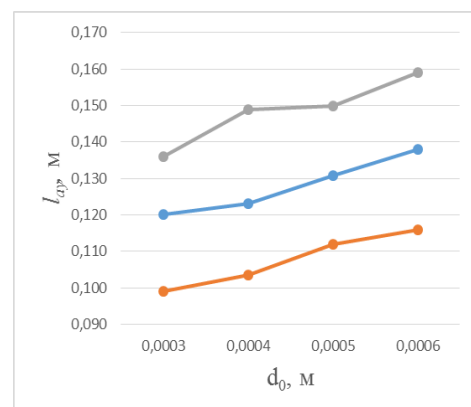


Рис. 3. Влияние диаметра струеформирующей насадки и давления воды на длину активного участка струи: 1 - $P_0=30$ МПа; 2 - $P_0=40$ МПа; 3 - $P_0=50$ МПа; $d_k/d_0=3$; $\mu=0,6$.

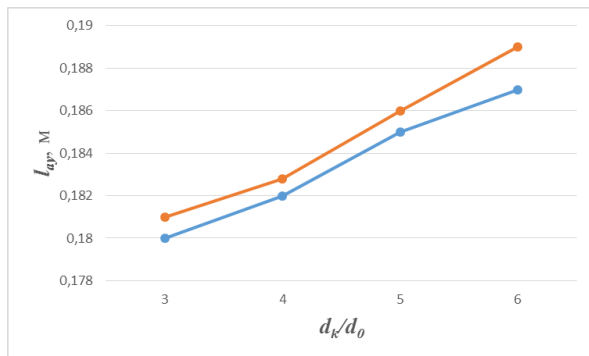


Рис. 4. Влияние соотношения d_k/d_0 на длину активного участка струи: 1 - $\mu=0,6$; 2 - $\mu=0,7$; $P_0=60$ МПа; $d_0=0,0006$ м

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что при увеличении давления воды длина активного участка струй $l_{a,y}$ увеличиваются (рис. 3). Установлено, что с увеличением диаметра струеформирующей насадки при неизменном давлении, длина активного участка струи $l_{a,y}$ также увеличиваются (рис. 3). Так, при увеличении давления воды от 30 до 50 МПа длина активного участка возрастает на 34% для всех диаметров насадок. При этом увеличение диаметра насадки от 0,0003 до 0,0006 м при неизменном давлении приводит к увеличению длины активного участка струи в среднем на 15,5%. На наш взгляд рост $l_{a,y}$ с увеличением P_0 и d_0 связан с увеличением расхода воды высокого давления, и, в случае увеличения давления, к увеличению скорости истечения струи. При этом увеличивается транспортирующая способность струи и большее количество твердых частиц (льда) увлекаются в поток, который приобретает большую устойчивость.

Список литературы

1. Козлов Ю. С., Кузнецов О. К., Тельнов А. Ф. Очистка изделий в машиностроении. - М.: Машиностроение, 1982. - 261 с.
2. Степанов Ю. С., Бурнашов М. А., Прежбилов А. Н. Теоретическое обоснование развития метода очистки поверхности деталей машин высоконапорной водоледяной струей с заранее подготовленными частицами льда // сборник научных трудов первой международной заочной научно-технической конференции /под ред. В. И. Гузеева и А. А. Дьяконова. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. — с.468-471.
3. Бурнашов, М. А., Прежбилов А. Н. Очистка поверхностей деталей автомобилей водоледяной

струей с заранее подготовленными частицами /М. А. Бурнашов, А. Н. Прежбилов // Мир транспорта и технологических машин. - 2015. - № 3(50). - С. 46-50.

4. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Головин К.А. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – 318 с.
5. Талыпов Ш. М. Совершенствование техники и технологии термоабразивной очистки внутренней поверхности насосно-компрессорных труб от солевых отложений. Диссертация кандидата технических наук. Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2009. – 108с.
6. Sure waterjet can clean, but can it peen? // The Shotpeener. – Winter 2006 // www.shotpeener.com/library/pdf/2006001.pdf
7. Burnashov M A, Prezhbilov A N 2018 Study of energy parameters of machine parts of water-ice jet cleaning applications. The XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2017). Volume 327.

References

1. Kozlov Yu., Kuznetsov O. K., tel'nov A. F. Cleaning products in mechanical engineering. - M.: Mashinostroenie, 1982. – 261 s.
2. Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Prezhbilov A. N. Teoreticheskoe obosnovanie razvitiia metoda oчитki poverkhnosti detalei mashin vysokonapornoi vodoledianoi struei s zaranee podgotovlennymi chastitsami l'da // sbornik nauchnykh trudov pervoi mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-tekhnikheskoi konferentsii /pod red. V.I. Guzeeva i A.A. D'ia-konova. – Cheliabinsk: Izdatel'skii tsentr IuUrGU, 2014. – s.468-471.
3. Burnashov M.A., Prezhbilov A.N. Oчитka poverkhnosti detalei avtomobilei vodoledianoi struei s zaranee podgotovlennymi chastitsami (stat'ia). - Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin – Orel: Gosuniversitet-UNPK, 2015. - № 3(50). s.46-50.
4. Stepanov Yu.S., Burnashov M.A., Golovin K.A. Progressivnye tekhnologii gidrostruynogo rezaniia materialov. – Tula: Izd-vo TulGU, 2009. – 318 s.
5. Talypov Sh. M. Sovershenstvovanie tekhniki i tekhnologii termoabrazivnoi oчитki vnutrennei poverkhnosti nasosno-kompressornykh trub ot solevykh otlozhenii. Dissertatsiia kandidata tekhnicheskikh nauk. Ufimskii gosudarstvennyi neftianoi tekhnicheskii universitet, 2009. – 108s.
6. Sure waterjet can clean, but can it peen? // The Shotpeener. – Winter 2006 // www.shotpeener.com/library/pdf/2006001.pdf
7. Burnashov M A, Prezhbilov A N 2018 Study of energy parameters of machine parts of water-ice jet cleaning applications. The XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS 2017). Volume 327.

УДК 621.793.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЯХ

Д.М. Галимов¹, Д.В. Ардашев¹, А.А. Дьяконов¹¹ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск, Российская Федерация

Аннотация

Методами металлографии с изготовлением микрошлифов исследованы образцы гальванического хромового покрытия, нанесенного на стальную основу. Определены характеристики микроструктуры, микротвердость и марки стали в исследуемых образцах. Проведен анализ качества хромового покрытия по результатам исследований поверхности и поперечных шлифов методами оптической микроскопии, а также методами сканирующей электронной микроскопии. Определена микротвердость хромового покрытия испытываемых образцов, отмечена склонность к хрупкому разрушению при большей твердости покрытий.

Ключевые слова: хромовое покрытие, микротвердость, металлография.

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF SOLID CHROMIUM COATING ON STEEL DETAILS

D.M. Galimov¹, D.V. Ardashev¹, A.A. Dyakonov¹¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Abstract

By methods of metallography with the manufacture of microsections, samples of a galvanic chrome coating applied to a steel substrate have been investigated. The characteristics of the microstructure, microhardness and steel grades in the samples are determined. The analysis of the quality of chrome coatings based on the results of surface and cross-section analysis by optical microscopy and scanning electron microscopy was carried out. The microhardness of the chromium coating of the test specimens was determined, and the tendency to brittle fracture was noted with greater hardness of the coatings.

Keywords: chromium coating, microhardness, metallography.

Введение

При определении качества хромового покрытия наиболее важными являются такие характеристики, как адгезия, наличие трещин, пористость покрытия, твердость и микротвердость покрытия, равномерность распределения покрытия по детали, шероховатость поверхности покрытия [1, 2]. Наиболее информативным методом оценки качества хромовых покрытий является исследование поперечных микрошлифов деталей с хромовым покрытием. Для анализа качества покрытия желательны сопутствующие исследования металла основы детали, а именно определение ее микротвердости и

микроструктуры для определения соответствия состояния металла основы технологическому режиму (например, закалке приповерхностного слоя), примененного перед нанесением покрытия [3-8].

Известно, что свойства электролитических осадков хрома, полученных из одного и того же электролита, весьма чувствительны к величинам температуры электролиза и катодной плотности тока [1, 4]. Варьируя эти параметры, можно получать или твердые и блестящие, но трещиноватые и пористые покрытия, или мягкие, но беспористые отложения «молочного» хрома. Чтобы совместить твердость, износостойкость и блеск с высокой коррозионной стойкостью, при-

меняют комбинированное хромовое покрытие, где первый слой является более мягким «молочным» покрытием, а второй – твердым и блестящим [9].

Для оптимизации методики исследования качества покрытий в данной работе были проведены сравнительные исследования различных хромовых покрытий по микротвердости покрытия и материала основы, а также их металлографические исследования с применением металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer Dlm и растрового электронного микроскопа Jeol JSM7001F.

Результаты и обсуждение

В качестве объектов исследования были выбраны четыре цилиндрических детали под номерами 1, 2, 3 и 4, с нанесенным на их поверхность хромовым покрытием различной толщины, полученным при близких технологических режимах. Покрытия были получены при плотности тока 75-80 А/дм², температуре электролита 55-65 °С, время хромирования составляло 35-60 мин. Характеристики образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры цилиндрических деталей с нанесенным покрытием хрома

Номер образца	Диаметр, мм	Марка стали (по данным изготовителя)	Толщина покрытия, мкм
1	90	45	25
2	81	45	42
3	137	40X	51
4	137	40X	44

Схема вырезки и пробоподготовки образцов для исследования твердости основного металла и покрытия, а также аттестации химического состава и микроструктуры материала основы приведена на (рис. 1).

Для анализа качества основного металла и его поверхностного слоя, закаленного токами высокой частоты (далее – ТВЧ), из детали были вырезаны поперечные шлифы (сечение 3, рис. 1), которые были протравлены 4% раствором HNO₃ в этиловом спирте. Оценку глубины слоя, закаленного ТВЧ, и микроструктуру металла основы также

проводили на образцах, вырезанных по радиусу (разрез по радиусу – 1, рис. 1) Характер микроструктуры поверхности и её параметры оценивали на образцах типа 2 (цилиндрическая поверхность, рис. 1)

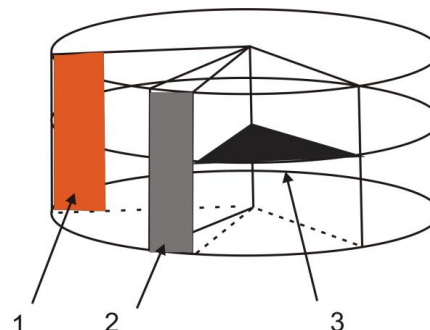


Рис. 1. Схема вырезки образцов для исследования твердости и микроструктуры покрытия и основного металла: 1 – сечение по радиусу, 2 – цилиндрическая поверхность, 3 – поперечное сечение

Общий вид образцов для исследования, в виде фрагментов, вырезанных из дисков с покрытиями по сечению 3, приведен на (рис. 2). Для выполнения отдельных этапов работы образцы были запрессованы в термопластичную пластмассу и представляли собой диски диаметром 30 мм с металлическими фрагментами, вырезанными согласно (рис 1).

На образцах 2 и 4 наблюдается приповерхностный слой, связанный с изменением структуры основы при термической обработке (закалка ТВЧ) [10-12].

Для определения химического состава сталей, из которых были изготовлены исследуемые диски с покрытиями, были подготовлены образцы в сечении 1 и на эмиссионном спектрометре Belec Vario Lab определен химический состав основы (таблица 2). Образцы 1 и 2 соответствуют стали 45 по ГОСТ 1050-74, образцы 3 и 4 стали 38ХА по ГОСТ 10702-78. По содержанию углерода и хрома образцы 3 и 4 соответствуют и стали 40Х, но по содержанию вредных примесей серы и фосфора, их следует отнести к высококачественной стали 38ХА по ГОСТ 10702-78. Таким образом, составы всех образцов близки заявленным изготовителем.

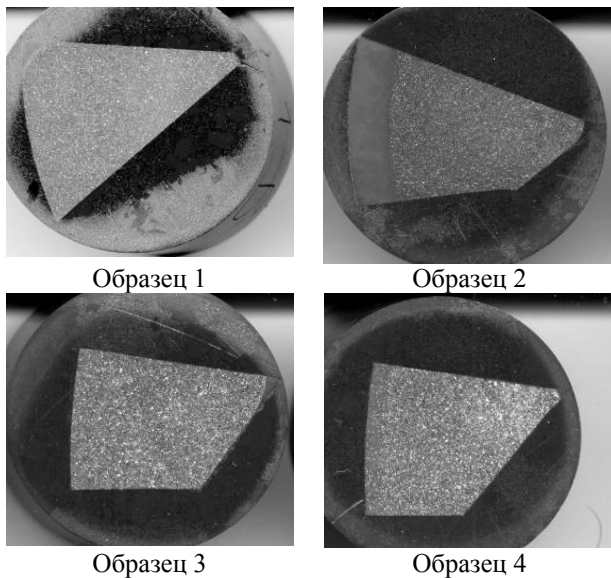


Рис. 2. Макроструктура приповерхностных областей дисков в натуральную величину.
Хромовое покрытие на всех образцах слева

Исследование микроструктуры основы дисков показало, что характер микроструктуры соответствует химическому составу, приведенному в табл. 2. Микроструктура основного металла, кроме упрочненного слоя ТВЧ, представляет собой зерна перлита (темные) и феррита (светлые) (рис. 3). Вертикальная светлая полоса слева представляет собой хромовое покрытие в поперечном сечении, на ней указаны толщины

покрытия в микрометрах в точках замеров. Толщина покрытия, определенная по микроструктурным исследованиям, близка заявленной изготовителем величине 25 мкм. Наблюдаются трещины в покрытии, достигающие до основного металла.

По характеру макроструктуры можно отметить, что макроструктура основного металла образцов 1 и 2 близка между собой. Макроструктура образцов 3 и 4 также близка между собой, как и их размер аустенитного зерна, что также соответствует близким маркам сталей по составу.

Микроструктура приповерхностного слоя основы образца 1 (рис. 3) представляет светлую ферритную сетку и перлитные зерна. Видна характерная для перлита пластинчатая структура. Такая структура формируется при нормализации, представляющей нагрев до аустенитного состояния (выше критической точки A_{C3}) и последующее охлаждение на спокойном воздухе [13, 14]. Структура материала основы однородная, размер зерен составляет 80 – 120 мкм, что соответствует 5 – 6 номеру аустенитного зерна.

Таблица 2 – Содержание элементов в сталях и марка стали

Номер образца	Содержание элементов, %							Марка стали
	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	
1	0,46	0,23	0,64	Менее 0,005	Менее 0,005	0,030	0,04	Сталь 45 По ГОСТ 1050-74
2	0,46	0,19	0,56	Менее 0,005	Менее 0,005	0,020	0,06	Сталь 45 По ГОСТ 1050-74
3	0,38	0,25	0,56	Менее 0,005	Менее 0,005	0,024	0,85	Сталь 38ХА ГОСТ 10702-78
4	0,38	0,25	0,56	Менее 0,005	Менее 0,005	0,024	0,85	Сталь 38ХА ГОСТ 10702-78

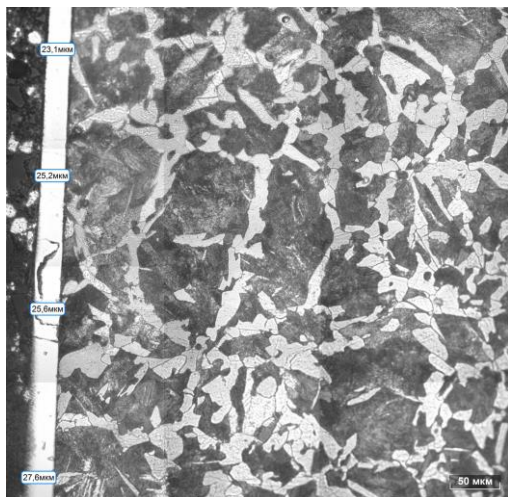


Рис. 3. Микроструктура приповерхностного слоя образца 1 (×500)

На поверхности образца 1 (рис. 4) видны характерные параллельные полосы, возникшие, по-видимому, при механической обработке или износе [15].

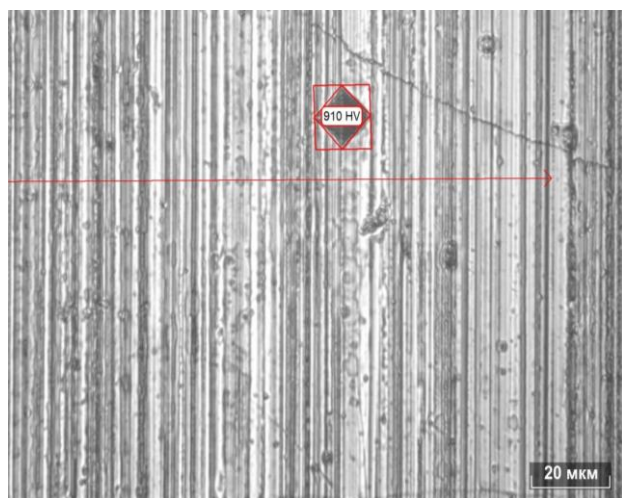


Рис. 4. Отпечаток при измерении микротвердости покрытия образца 1 на поверхности при нагрузке 100 г (сечение 2)

Микроструктура основы образца 2 представляет термоупрочненный закалкой ТВЧ слой (более темный, рис. 2), однако в микроструктуре закаленного слоя наблюдаются светлые ферритные участки, что говорит о недостаточной температуре нагрева при закалке [12, 13].

Типичный отпечаток индентора при измерении микротвердости образца 2 в сечении 3 приведен на (рис. 5). Хромовое покрытие

имеет трещины, доходящие до основного металла.

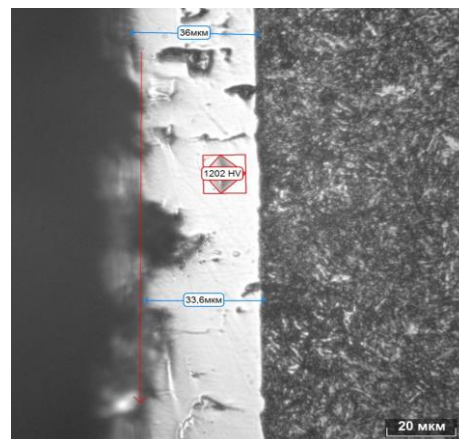


Рис. 5. Отпечаток при измерении микротвердости образца 2 на поперечном микрошлифе (сечение 3) при нагрузке 100 г. Покрытие имеет светлый вид, справа от слоя видна структура основного металла

Поверхность покрытия образца 2 имеет характерный рельеф и хаотично расположенные трещины, сколов и нарушения сплошности покрытия не наблюдается.

Микроструктура основного металла (основы) образца 3 представляет светлую ферритную сетку и перлитные зерна. Поверхность покрытия образца 3 без сколов, как и в случае образца 2, также имеет рельеф и трещины.

При исследовании образца 4 обнаружены светлые ферритные зерна вблизи покрытия (рис. 6), которые свидетельствует о недогреве при закалке ТВЧ, что неизбежно приводит к пониженной твердости и прочности закаленного слоя.

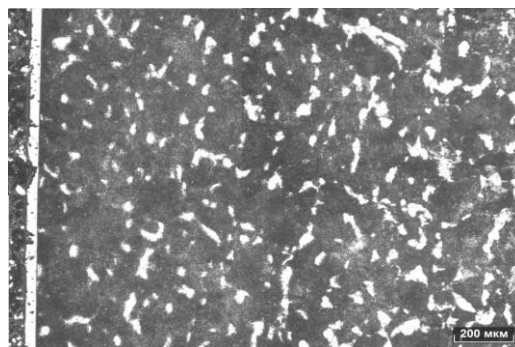


Рис. 6. Микроструктура приповерхностного слоя образца 4. Вертикальная светлая полоса (слева) представляет хромовое покрытие (×100)

Структура основного металла представляет феррит и перлит. Такая структура формируется обычно при нормализации, представляющей нагрев до аустенитного состояния (выше критической точки A_{C3}) и последующее охлаждение на спокойном воздухе. Меньшее количество ферритной фазы, по сравнению с равновесным, указывает на завышенную температуру нормализации [12].

Микроструктура основы (справа от покрытия) представляет термоупрочненный закалкой ТВЧ слой (более темный). Но в микроструктуре закаленного слоя наблюдаются светлые ферритные участки, что говорит о недостаточной температуре нагрева при закалке. Микроструктура основы представляет светлую ферритную сетку и темные зерна пластинчатого перлита. Среднее значение микротвердости покрытия образца 4 при нагрузке 100 г составило 869 HV, стандартное отклонение 248. Такая большая ошибка определения твердости связана с повышенной хрупкостью покрытия [16].

Следует заметить, что хромовое покрытие всех образцов имеет трещины, достигающие до основного металла, что подтверждает предположение о наличии именно твердого покрытия с повышенной хрупкостью [16]. Следует учесть, что подобные трещины образуются как при получении покрытия, так и на стадии изготовления микрошлифа [15, 17]. Данные дефекты покрытия свидетельствуют о повышенной твердости покрытия, которая приводит к повышенной хрупкости покрытия исследованных образцов.

Дополнительное исследование проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии [18-21]. Для определения толщины хромированного слоя производили измерения при увеличениях $\times 1000$ крат. Определение толщины слоя покрытия и его равномерность проводили по 5 полям, отстоящим друг от друга на величину одного или более полей изображения. Усредненные значения толщины покрытий представлены в табл. 3.

Типичный участок и измеренные значения толщины слоя покрытия представлены на рисунке 7, толщина покрытия указана в мкм. Под слоем покрытия наблюдается

структура металлической основы, состоящей из ферритных зерен и перлитных колоний с характерным пластинчатым строением. В покрытии наблюдаются вертикальные трещины хромового слоя. Изучение поверхности покрытия с помощью сканирующей электронной микроскопии на всех образцах не показало принципиальных отличий от оптической микроскопии [18,19].

Характерное изображение поверхности покрытия (сечение 2) при увеличении $\times 500$ приведено на рисунке 8. На поверхности видна сетка трещин и система вертикальных полос, по-видимому, следов износа или механической обработки.

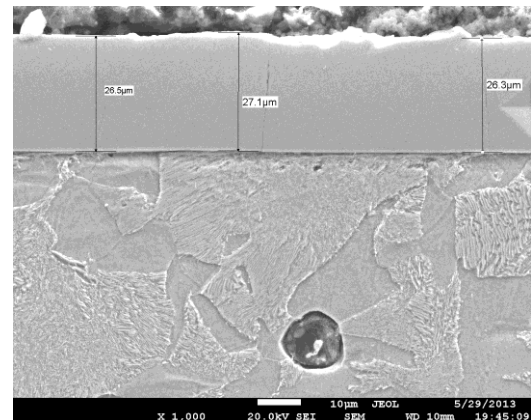


Рис. 7. Типичный участок и измеренные значения толщины слоя покрытия. Возле стрелок указана их длина в мкм

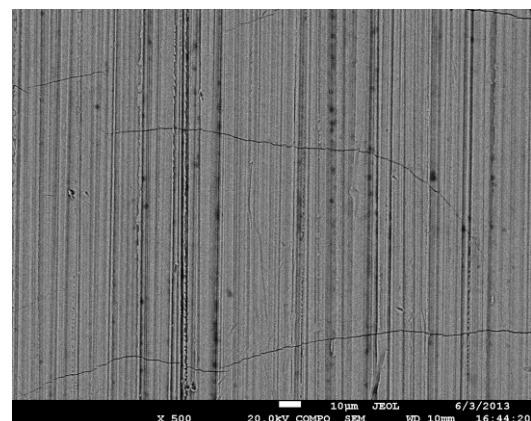


Рис. 8. Изображение поверхности образца 1 ($\times 500$).

Для всех образцов были проведены испытания микротвердости по Виккерсу при нагрузке 100 Г на срезе покрытия и на поверхности покрытия [7,8, 16]. Результаты

измерения микротвердости всех образцов с покрытиями отражены в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики образцов с хромовым покрытием

Номер образца	Марка стали	Толщина покрытия, мкм	Микротвердость (везде при нагрузке 100 г), HV			Глубина слоя ТВЧ, мкм
			на срезе	на поверхности	основного металла	
1	45	25	878	917	240	-
2	45	42	1023	1089	180 – 190	3932
3	38ХА	51	1043	1152	197	-
4	38ХА	44	869	1050	180 – 200	3785

Выводы

Наиболее информативным методом аттестации качества хромового покрытия и материала основы является исследование их микроструктуры и микротвердости. К характеристикам, которые можно определить данным методом следует отнести характер прилегания покрытия, его толщину, наличие пор и микротрещин покрытия, рельеф материала основы и рельеф внешней поверхности покрытия.

Методы оптической металлографии, испытания твердости методом определения микротвердости по Виккерсу, исследования морфологии покрытия и материала основы методами сканирующей электронной микроскопии, совмещенные с рентгеноспектральным изучением химического состава, позволяют провести сравнительный анализ качества хромового покрытия образцов деталей, а также получить изображения высокого качества при увеличениях, недоступных методам оптической металлографии. Можно отметить большее разрешение и лучшую детализацию изображения, получаемого методом сканирующей электронной микроскопии, по сравнению с изображением оптических металлографических микроскопов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в ходе выполнения проекта «Создание энергоэффективной и экологичной технологии нанесения твердохромовых покрытий на тела вращения», реализуемого в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 14.578.21.0256 (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57817X0256).

Список литературы

1. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник. В 2-х т. М.: Машиностроение. 1985. Т. 2. 248 с.
2. Девис С., Джеймс А. Электрохимический словарь: М.: Мир. 1979. 288 с.
3. Дасоян М.А, Пальмская И.Я. Оборудование цехов электрохимических покрытий: 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение. 1979. 287 с.
4. Федотьев Н.П. Прикладная электрохимия. Химия, 1962. — 642 с.
5. Методы исследования материалов и процессов: Методические указания для самостоятельной работы / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. Л.Г. Борисова. СПб, 2016. 63 с.
6. ГОСТ 9.302 – 88. Покрытия металлические и неметаллические. Методы контроля. Госстандарт, 1990. – 50 с.
7. Вячеславов, П. М. Методы испытания электрохимических покрытий. / П. М. Вячеславов, Н. М. Шмелева. - Л.: Машиностроение, 1977. – 88 с.
8. Годовская, К. И. Лабораторный практикум по техническому анализу и контролю качества электрохимических покрытий. / К. И. Годовская, Л. Т. Толстая. – М.: Машиностроение, 1984.
9. Румянцев, К.Е. Физические и технологические свойства покрытий: Учеб. пособие / ГОУ ВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2007. - 80 с.
10. Баскаев Х. К. Металловедение и термическая обработка металлов: учебно-методическое пособие по дипломному проектированию: учебное пособие для техникумов / Х. К. Баскаев, А. И. Самоходский. - Москва: Машиностроение, 1966
11. Асонов А.Д. Технология термической обработки деталей машин. М.: Машиностроение, 1969г. 264с.
12. Никифоров В.М. Технология металлов и других конструкционных материалов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. школа, 1977. – 304 с.
13. Лейкин А.Е. Материаловедение/ учебник для студентов машиностроительных специальностей высших учебных заведений/ А. Е. Лейкин, Б. И. Родин. - Москва: Высшая школа, 1971. – 413 с.
14. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 527 с.

15. Гаркунов Д.Н. Триботехника/ 1985, 424 с.
16. Калмыков, А. Г. Методы определения твёрдости металлических материалов: Учебно-справочное пособие. / А. Г. Калмыков, Ю. И. Головин, В. Ф. Терентьев и др.; Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2000. 80 с.
17. Коротин А.И., Технология нанесения гальванических покрытий: Уч. Пособие. - М.: Высшая школа, 1984, 200 с.
18. Ясников И.С., Нагорнов Ю.С., Горбачев И.В., Микеев Р.Р., Садовников П.С., Шубчинская Н.Ю., Аминаров А.В. Сканирующая электронная микроскопия как метод изучения микроскопических объектов электролитического происхождения // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1-3. – С. 758-764;
19. Криштал, М.М. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин и др. – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.
20. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
21. Быков, Ю. А. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ. Аппаратура, принцип работы, применение / Ю. А. Быков, С. Д. Карпукhin, М. К. Бойченко и др. Электр. дан. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. Режим доступа: <http://lab.bmstu.ru/rem/index/htm>
9. Rumyantseva K.E., Physical and technological properties of coatings: Manual. Fizicheskie i tehnologicheskie svoystva pokrytij: Ucheb. posobie, Ivanovo, GOU VPO ISCTU, 2007, 80 p.
10. Baskaev Kh. K., Samokhotsky A.I., Metal Science and Heat Treatment of Metals: A Teaching and Methodological Manual on Diploma Projecting: A Textbook for Technical Schools. Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov: uchebno-metodicheskoe posobie po diplomnomu proektirovaniju: uchebnoe posobie dlja tehnikumov, Moscow, Mechanical Engineering, 1966.
11. Assonov A.D., Technology of the thermal processing of machine parts. Tehnologija termicheskoy obrabotki detalej mashin, Moscow, Mechanical Engineering, 1969, 264 p.
12. Nikiforov V.M., Technology of metals and other structural materials. - 2 nd ed., revised and added. Tehnologija metallov i drugih konstrukcionnyh materialov. - 2-e izd., pererab. i dop., Moscow, Higher education. school, 1977, 304 p.
13. Leikin A.E., Rodin B.I., Material science. Materialovedenie, Moscow, High School, 1971, 413 p.
14. Lakhtin Yu. M., Leontieva V.P., Material Science. Materialovedenie, Moscow, Mechanical Engineering, 1990, 527 p.
15. Garkunov D.N., Tribotechnics. Tribotekhnika, 1985, 424 p.
16. Kalmykov A.G., Golovin Yu. I., Terentyev V.F. et al., Methods for determining the hardness of metallic materials: Educational and reference manual. Metody opredelenija tvjrdosti metallicheskih materialov: Uchebno-spravochnoe posobie, Voronezh, VSTU Publishing House, 2000, 80 p.
17. Korotin A.I., Technology of drawing galvanic coatings: Manual. Tehnologija nanesenija gal'vanicheskikh pokrytij: Uch. Posobie, Moscow, Higher School, 1984, 200 p.
18. Yasnikov I.S., Nagornov Yu.S., Gorbachev I.V., Mikeev R.R., Sadovnikov P.S., Shubchinskaya N.Yu., Aminarov A.V., Scanning electron microscopy as a method of studying microscopic objects of electrolytic origin, Fundamental research, 2013, No. 1-3 pp. 758-764.
19. Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I. et al., Scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis in practical applications. Skanirujushaja jelektronnaja mikroskopija i rentgenospektral'nyj mikroanaliz v primerah prakticheskogo primenenija, Moscow, Technosphere, 2009, 208 p.
20. Brandon D., Kaplan U., Microstructure of materials. Methods of research and control. Mikrostruktura materialov. Metody issledovanija i kontrolja, Moscow, Technosphere, 2004, 384 p.
21. Bykov Yu. A., Karpukhin S.D., Boichenko M.K. et al., Raster electron microscopy and X-ray spectral analysis. Apparatus, principle of operation, application. Rastrovaja jelektronnaja mikroskopija i rentgenospektral'nyj analiz. Apparatura, princip raboty, primenenie, Moscow, MSTU of N.E. Bauman, 2003.

References

1. Shluger M.A., Galvanic coatings in mechanical engineering: Handbook. Gal'vanicheskie pokrytija v mashinostroenii: Spravochnik, Moscow Mashinostroenie, 1985, 248 p.
2. Davis S., James A., Electrochemical Dictionary. Jelektrohimicheskij slovar', Mir, 1979, 288 p.
3. Dasoyan M.A., Palmskaya I.Ya., Equipment of electrochemical coatings shops, third ed. Oborudovanie cehov jelektrohimicheskikh pokrytij: 3-e izd., pererab. i dop., Leningrad, Mechanical Engineering, 1979, 287 p.
4. Fedotiev N.P., Applied Electrochemistry. Prikladnaja jelektrohimija, Chemistry, 1962, 642 p.
5. Borisova L.G., Methods of researching materials and processes: Methodological guidelines for independent work. Metody issledovanija materialov i processov: Metodicheskie ukazanija dlja samostojatel'noj raboty, Saint Petersburg, St. Petersburg Mining University, 2016, 63 p.
6. GOST 9.302 - 88. Metallic and non-metallic coatings. Control methods. Gosstandart, 1990.
7. Vyacheslavov P.M., Shmelev N.M., Methods of testing electrochemical coatings, Mechanical Engineering. Metody ispytaniya jelektrohimicheskikh pokrytij, Leningrad, 1977, 88 p.
8. Godovskaya K. I., Tolstaya L., Laboratory workshop on technical analysis and quality control of electrochemical coatings. Laboratornyj praktikum po tehničeskomu analizu i kontrolju kachestva jelektrohimicheskikh pokrytij, Moscow, Mechanical Engineering, 1984, 424 p.

УДК 621.9.047

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ДЕТАЛЕЙ

А.Ю. Рязанцев¹, С.С. Юхневич²¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация²«Воронежский механический завод» - филиал АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Раскрыты возможности расширения области использования комбинированной обработки для получения искусственной шероховатости на поверхностях деталей. Показаны пути обеспечения стабильности процесса, повышения технологических показателей, что позволило расширить область применения высокопроизводительной размерной комбинированной обработки с использованием прецизионного импульсного волоконного лазера в составе лазерного комплекса. Подобная задача решена впервые и её результаты способствуют созданию изделий новых поколений техники, что актуально для машиностроения.

Ключевые слова: комбинированная обработка, искусственная шероховатость, изделие, машиностроение, деталь.

USE OF COMBINED METHODS OF TREATMENT TO OBTAIN ARTIFICIAL ROUGHNESS ON THE PARTS' SURFACES

A.Yu. Ryazantsev¹, S.S. Yukhnevich²¹ Voronezh State Technical University, Moskovsky Prospekt, 14, Voronezh, Russian Federation,² Voronezh Mechanical Plant, Voronezh, Russian Federation

Abstract

Opportunities of combined treatment field of use expanding for obtaining of artificial roughness on the parts' surfaces are unveiled. The way of assurance of process stability and rise of technological parameters are shown, which allowed to expand the application field of high-efficiency dimensional combined treatment with the use of precision impulse optical fiber laser as a part of laser complex. Such a task is resolved for the first time and its results contribute to creation of items of new generation of equipment, which is relevant for mechanical industry.

Keywords: combined treatment, artificial roughness, product, mechanical engineering, detail.

В настоящее время производство аэрокосмической отрасли характеризуется большой номенклатурой и сложностью производимых изделий, в то же время требования к изготовлению деталей и сборочных единиц ужесточается. На первый план выходят такие показатели, как гибкость, оперативное перенастраивание производства для получения экспериментальных изделий ракетно-космической техники. В этих условиях представляют интерес высокотехнологичные способы комбинированной размерной обработки, с возможностью быстрого перехода на обработку изделий различных конструкций и типоразмеров. Комбинированными

называют методы, в которых процесс преобразования или удаления обрабатываемого материала происходит в результате одновременного протекания двух и более воздействий, осуществляемых каждым по своему механизму. Примерами могут служить сочетания следующих воздействий: электрохимического и механического; электроэрозионного и электрохимического; ультразвукового и механического и т.д. Производительность такого метода обработки, как правило, значительно выше суммы производительностей каждого метода, взятого отдельно [1]. Путем технологического воздействия в поверхностном слое создаются такие механические свойства и остаточные напряжения,

которые в наибольшей степени соответствуют условиям длительной и надежной эксплуатации. Качество поверхности деталей машин зависит в основном от метода и режимов проведения отделочной обработки. Для укрепления поверхностного слоя необходимо использовать специальные методы обработки.

Важность их рассмотрения обусловлена тем, что поверхностные слои деталей машин особенно ответственны. Многие эксплуатационные свойства машин, такие как износостойкость, контактная жесткость, усталость, коррозионная стойкость, электро- и теплосопротивление контактов, герметичность соединений и другие в большой мере определяются контактным взаимодействием деталей, в основе которого лежат свойства поверхностных слоев. Чаще всего именно в них появляются очаги усталостного разрушения. Качество поверхностного слоя деталей машин, приборов и аппаратов определяет надежность и долговечность изделий в эксплуатации. Формирование же качества поверхностного слоя в основном осуществляется на заключительных операциях технологического процесса получения деталей.

Физико-механические свойства поверхностного слоя деталей машин изменяются под влиянием комплексного действия силовых и тепловых факторов в процессе обработки. При обработке лезвийными инструментами преобладающее влияние оказывают силовые факторы. Результатом силового действия при пластической деформации является разрушение структуры, повороты и смещения кристаллов, наклеп поверхностного слоя, характеризуемый повышением микротвердости и снижением вязкости. В поверхностном слое возникают остаточные напряжения, которые в зависимости от режима обработки могут быть положительными или отрицательными [2].

Поверхностный слой детали машины, обработанный режущим инструментом, сильно отличается по структуре и физическим свойствам от сердцевины детали. Давление резца вызывает пластическую деформацию вязких металлов (стали, меди и др.) не только в снимаемой стружке, но и в по-

верхностном слое. Иногда резец разрушает структуру поверхностного слоя на значительную глубину.

На кафедре «Физико-химические процессы и технологии» Тульского государственного университета проводились исследования по следующим видам обработки материалов: электрохимическая обработка микро- и макрообъектов; электрохимическое полирование; электроэрозионная обработка узких длинномерных пазов; микроэлектроэрозионная обработка; высокоскоростное электролитическое осаждение металлов и сплавов; микродуговое оксидирование; ионно-плазменное напыление; ионная имплантация азота и др. В результате для производства изделий пищевого и химического машиностроения с повышенными требованиями к качеству поверхностей, были разработаны и экспериментально апробированы способы электрохимической обработки деталей сепараторов на малых межэлектродных зазорах и с определенной кинематикой движения электродов. Реализована электроэрозионная обработка длинномерных пазов в трубах переменного сечения при изготовлении элементов аппаратуры для нефтяной отрасли [3]. Представленные методы требуют большой технологической подготовки производства, энергетических затрат. В некоторых экспериментах, обрабатываемый материал обладал невысокими прочностными параметрами по отношению к исходному материалу. В следствии чего, можно сделать вывод, что применение вышеуказанных методов в ракетно-космической отрасли для получения искусственной шероховатости в теплонагруженных деталях ракетных двигателей экономически не целесообразно.

Известны способы, в которых для регулируемых шероховатых поверхностей используют электротермическое воздействие движущихся катодных пятен в вакуумном дуговом разряде. Размеры шероховатости регулируются током и временем воздействия разряда, давлением в вакуумной камере и рядом других параметров [4]. Недостатками способа является возможное нарушение качества поверхностного слоя (например, боковых поверхностей пазов в тепло-

нагруженных деталях) при импульсе большой энергии, ограничение площади теплопередачи, низкая производительность.

Также искусственную шероховатость получают обработкой детали электродом – инструментом на электроэрозионном оборудовании. При этом обработку выполняют в два этапа: на первом этапе, грубом режиме, электроимпульсным методом на рабочей части электрода – инструмента наносят неровности в виде соприкасающихся углублений, после чего на чистовом режиме электроискровой обработкой электродом – инструментом формируют шероховатость на обрабатываемом участке [5]. Недостатками способа являются относительно большой износ электрода – инструмента (например, величина износа латунных электродов составляет 25-30%, объема металла, снятого с детали), что значительно удорожает этот вид обработки и затрудняет получение необходимой точности, требует большого расхода энергоресурсов, производительность сравнительно низка.

Анализ методов показал, что в современной науке и технике существует потребность в создании шероховатых поверхностей металлических изделий. Одним из наиболее эффективных направлений совершенствования технологий получения шероховатости является комбинирование различных методов воздействия на обрабатываемую поверхность.

Для получения искусственной шероховатости в настоящее время внедряется в серийное производство высокопроизводительный способ обработки, позволяющий получать детали, без снижения качества поверхностного слоя изделия.

Способ комбинированной размерной обработки включает в себя обработку детали лазерным способом с использованием импульсного волоконного лазера на прецизионном лазерном комплексе на первом этапе, после чего на чистовом режиме электрохимической обработкой получают окончательно сформированную искусственную шероховатость на поверхности обрабатываемой детали.

Примером осуществления этого способа может служить формирование в трактах

охлаждения оболочки камеры сгорания, из листа сплава БрХ08 ТУ 48-21-588-87, ракетного двигателя, выполнение локального участка в донной части канала, для дополнительного охлаждения, рисунок 1.

Для этих целей комбинированные методы лазерной и электрохимической обработки ранее не использовались. Применялись менее производительные, механические, электроэрозионные и электрохимические обработки весьма трудоемкие и требующие существенных затрат на технологическую подготовку производства перед началом выполнения работ.

На экспериментальной детали в составе заготовки на образцах были проведены физико-механические и механические исследования, в том числе в термообработанном состоянии.

При проведении механических испытаний использовалось разрывная машина Р5 с камерой нагрева, в процессе химического анализа применялись фотоэлектрический фотометр КФК-3 и потенциометрическая установка.

Режим термообработки образцов: нагрев металла до 990 °С выдержка 30 минут, охлаждение до 600 °С, охлаждение водой до температуры 20 °С.

Результаты химического анализа не показали изменения структуры материала. Полученные результаты механических испытаний указаны в табл. 1.

Таблица 1. Результаты механических испытаний образцов из листа БрХ0,8 ТУ 48-21-588-87

В состоянии поставки		Образцов в термообработанном состоянии при температуре 20 °С	
Относительное удлинение, %	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Предел прочности, кгс/мм ²
48,9	24,9	48,9	23,4
55,6	25,1	46,7	23,7

Полученные результаты, позволяют сделать вывод, что заготовки соответствуют требованиям нормативной документации, в частности ТУ 48-21-588-87 и могут исполь-

зоваться для эксперимента и при изготовлении деталей ракетно-космической техники.

Эксперименты показали, что при мощности лазера до 50Вт, на рабочей части детали в канале охлаждения формируются участки с высотой неровностей 0,41 мм и шириной 0,82 мм в течении 0,1 минут.

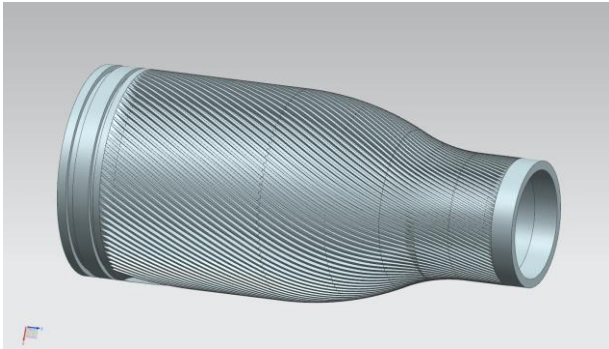


Рис. 1. Общий вид каналов охлаждения после обработки

При образовании поверхностного слоя подверженного температурным воздействиям, его удаление происходит электрохимической обработкой, на специальных технологических режимах.

Для изучения физико-механических свойств материала до и после обработки комбинированным методом и возможного изменения структуры материала. На образцах были проведены дополнительные исследования материала, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Результат механических испытаний образцов из листа БрХ0,8 ТУ 48-21-588-87 после нанесения искусственной шероховатости

В состоянии поставки		Образцов в термообработанном состоянии при температуре 20 °С	
Относительное удлинение, %	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	Предел прочности, кгс/мм ²
48,9	24,9	48,9	23,4
55,6	25,1	46,7	23,7

Полученные результаты, позволяют сделать вывод, что материал изготовленных деталей после нанесения искусственной шероховатости соответствует требованиям нормативной документации, изменение струк-

туры и свойств материала, влияющих на качество, не происходит. Заготовки соответствуют требованиям конструкторской документации, в частности ТУ 48-21-588-87.

Способ относится к области машиностроения и может быть использован при нанесении искусственной шероховатости на поверхности деталей, например, на прямых и криволинейных участках и боковых поверхностях каналов охлаждения теплонагруженной детали - оболочки, входящей в состав камер сгорания ракетного двигателя. Для этих целей комбинированные методы лазерной и электрохимической обработки ранее не использовались. Применялись менее производительные, механические, электроэрозионные и электрохимические обработки весьма трудоемкие и требующие существенных затрат на технологическую подготовку производства перед началом выполнения работ. В результате предложенной размерной комбинированной обработки, рабочие части детали в каналах охлаждения получены в соответствии с необходимыми технологическими параметрами, без снижения качества поверхностного слоя и надежности изделия. Сократилось время на технологическую подготовку перед обработкой, снижена трудоемкость не менее чем в 2 раза. В результате работ, оформлен патент №2618594, что расширяет область использования способа [6].

Обработка высокоскоростными комбинированными методами дает возможность обеспечить необходимые технологические требования к детали, не нарушает химический состав обрабатываемых материалов, что позволяет увеличить коррозионную стойкость материалов, улучшить механические свойства и увеличить ресурс работы. Полученные результаты позволяют использовать высокоскоростную комбинированную размерную обработку для изготовления изделий авиации, космонавтики и других отраслей промышленности из сплавов трудно поддающихся механической обработке, любой геометрической формы.

Результатом использования способа является получение искусственной шероховатости высокопроизводительным способом,

без снижения качества поверхностного слоя изделия, с необходимыми технологическими параметрами и расширение области использования способа. Примером осуществления способа, является получение искусственной шероховатости в каналах охлаждения оболочки камеры сгорания из сплава БрХ08 камеры сгорания ракетного двигателя.

Новизна данной работы состоит, в том что в ней впервые предложены прогрессивные способы комбинированной обработки получения регулируемой шероховатости на поверхностях. Предложены рабочие режимы обработки поверхностей деталей ракетных двигателей с целью получения шероховатости в соответствии с требованиями нормативной документации.

Результаты работы в настоящее время внедряются в серийное производство на машиностроительных предприятиях, оформлен патент №2618594, что расширяет область использования способа [6].

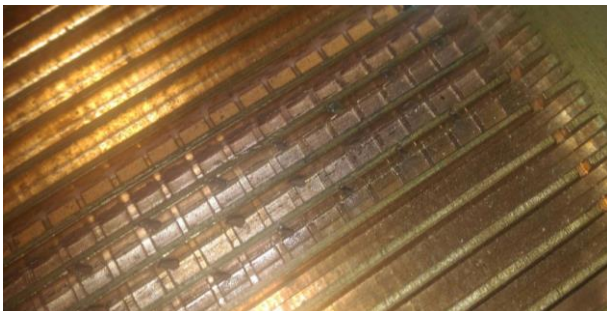


Рис. 2. Элемент искусственной шероховатости, полученный комбинированным методом обработки

Обработка высокоскоростными комбинированными методами дает возможность обеспечить необходимые технологические требования к детали, не нарушает химический состав обрабатываемых материалов, что позволяет увеличить коррозионную стойкость материалов, улучшить механические свойства и увеличить ресурс работы [7,8,9]. Полученные результаты позволяют использовать высокоскоростную комбинированную размерную обработку для изготовления изделий авиации, космонавтики и других отраслей промышленности из различных материалов, любой геометрической формы [10].

Список литературы

1. Рязанцев А.Ю., Кириллов О.Н. Механизм чистовой обработки электродом —щёткой/ Вестник Воронежского государственного технического университета // Сборник. - Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», том 11, №5, 2015, с. 8 — 13.
2. Рязанцев А.Ю., Баркалов М.В. Использование комбинированных методов обработки при экспериментальной отработке изделий ракетно – космической техники / Сборник статей VI научно – технической конференции молодых ученых и специалистов Центра управления полетами // Сборник. – Королев: ЦНИИМаш, 2016г., с. 42 – 48.
3. Любимов В.В. Сундуков В.К. Современные способы электрофизико-химической обработки микро-и макрообъектов / Журнал «Современные наукоемкие технологии», г. Саратов: ООО «Научно-издательский центр Академия Естествознания» – 2004. –№ 1 – С. 77-79
4. Аникеев В.Н., Докунин М.Ю. Получение регулируемой шероховатости металлических поверхностей в вакуумном дуговом разряде / Журнал «Инженерный вестник», г. Москва: Академия инженерных наук имени А.М. Прохорова – 2013 - №2 – с.3-4.
5. Авторское свидетельство №2464137. Российская Федерация, МПК В23Н Способ получения локального участка охлаждения теплонагруженной детали / В.П. Смоленцев и др. Опубликовано 20.10.2012 бюл. №29.
6. Авторское свидетельство № 2618594 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали комбинированным методом обработки / А.Ю. Рязанцев, С.С. Юхневич, В.А. Поротиков.-; опубл. 04.05.17, Бюл. № 13.
7. Писарев А.В. Управление технологическими показателями обработки электродом-щеткой / А.В. Писарев // Нетрадиционные методы обработки: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2002. С.22-31.
8. Кириллов О.Н. Чистовая обработка переходных участков непрофилированным электродом / О.Н. Кириллов // Известия ОрелГТУ, серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». 2009. №2-2/274 (560). С.66-71
9. Смоленцев В.П., Юхневич С.С., Мозгалин В.Л. Комбинированная обработка прессованных материалов / Вестник Воронежского государственного технического университета, ВГТУ, Воронеж, 2017 т. 13 № 2 с. 128-131.
10. Смоленцев В.П., Гребенщиков А.В., Юхневич С.С., Котуков В.И. / Механизм импульсных взаимодействий твердых тел при комбинированной обработке // Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», Межвузовский сборник, выпуск № 13, 2014 год, с. 12-18.

References

1. Ryazantsev A.Y. *Mechanism of finish machining by brush electrode* / A.Y. Ryazantsev, O.N. Kirillov // Voronezh State Technical University Bulletin. 2015. V.11. №5. P. 8 - 13.
2. Ryazantsev A.Y. *The use of combined methods of processing during experimental testing of rocket and space equipment* / A.Y. Ryazantsev, M.V. Barkalov // Collection of articles of the VI scientific and technical conference of young scientists and specialists of the Mission Control Center, Korolev, 2016, P. 42 - 48.
3. Lyubimov V.V. *Modern methods of electrophysico-chemical processing of micro- and macroobjects* / Lyubimov V.V., Sundukov V.K. // Journal of Modern Science-Based Technologies, Saratov, 2004, № 1, P. 77-79.
4. Anikeev V.N. *Obtaining an adjustable roughness of metal surfaces in a vacuum arc discharge* / Anikeev V.N., Dokunin M.Yu. // Journal of Engineering Herald, Moscow, 2013, №2, P.3-4.
5. Patent 2464137, Russian Federation, MPK V23N 5/02. *Method of obtaining a local cooling section of a heat-loaded part* / V.P. Smolentsev and others. №2010144769/02, announced 01.11.2010, published 20.10.2012, Bulletin № 29. 6 p.
6. Patent 2618594, Russian Federation, MPK V23N 5/02 *Method for obtaining an artificial roughness on the surface of a part by a combined processing method* / A.Yu. Ryazantsev, S.S. Yuhnevich, V.A. Porotikov, №2016110651; announced 22.03.2016; published. 04.05.2017, Bulletin. 13, 4p.
7. Pisarev A.V. *Control by technological parameters of machining by brush electrode* / A.V. Pisarev // Nontraditional machining methods: collected works. Voronezh, 2002. P.22-31.
8. Kirillov O.N. *Finish machining of transition sections by inshaped electrode* / O.N. Kirillov // News of Orel State Technical University, edition «Basic and applied problems of engineering and technologies». 2009. №2-2/274 (560). P.66-71.
9. Smolentsev V.P., *The combined processing of extruded materials* / V.P. Smolentsev, S.S. Yuhnevich, V.L. Mozgalin // The Bulletin of Voronezh State Technical University. Volume 13, № 2, PP. 128-131 (2017).
10. Smolentsev V.P., *Mechanism of pulsed effects of solids with combined treatment* / V.P. Smolentsev, A.V. Grebenshchikov, S.S. Yuhnevich, V.I. Kotukov // Voronezh State Technical University. Inter-collegiate collection. Volume 13. PP. 12-18 (2014).

УДК 669.14.462.3

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ ДЛЯ УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ

А.М. Смирнов¹, В.М. Терехов¹¹ФГАОУ ВО Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Изложен метод исследования особенностей динамики режущего инструмента при обработке глубоких отверстий. Вместо классического дифференциального уравнения второго порядка, связывающего угловое перемещение с координатой и временем, на основании дифференциального уравнения моментов количества движения для крутильных колебаний введены два уравнения первого порядка, описывающие в стержне связь углового ускорения с градиентом изменения касательного напряжения и скорости изменения напряжения с градиентом угловой скорости движения.

Ключевые слова: глубокое отверстие, сверло, шпиндель, стержень, стемпель, диск, скорость движения, касательное напряжение, оператор Лапласа, крутильные колебания.

MANUFACTURE OF DEEP HOLES FOR NODES FIXING HEAT EXCHANGER PIPES

А.М. Smirnov¹, V.M. Terekhov¹¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute) Moscow, Russian Federation

Abstract

The article describes the method for studying the dynamics of the cutting tool in the processing of deep holes. Instead of the classic second-order differential equation, two first-order equations introduced. These equations relate the angular acceleration and angular velocity with the shear stress.

Keywords: deep hole, drill, spindle, rod, stem, disc plate, motion speed, shear stress, Laplace operator, torsional vibration.

Одним из самых массовых способов изготовления деталей является механическая обработка заготовок (фрезерование, сверление, развертывание, растачивание и т.п.). К наиболее сложным технологическим операциям относится изготовление глубоких отверстий с помощью лезвийного инструмента, сверл, разверток и т.п. Технология получения таких отверстий требуемой точности и высокого качества в большой степени востребована в производстве энергетических аппаратов и атомных энергетических установок.

Из разнообразия факторов влияния на качество выполнения подобных работ следует выделить скорость движения режущей кромки инструмента в зоне резания, взаимодействие ее с поверхностью детали и сопровождающие физико-химические процессы,

как в обрабатываемой детали, так и при удалении стружки. В процессе сверления возникают различные динамические явления, негативно сказывающиеся на работоспособности инструмента, и как следствие, качестве отверстия. Поэтому исследование особенностей динамики обработки глубоких отверстий является актуальной задачей в разработке инновационных металлообрабатывающих технологий.

В теории резания металлов операция считается технологичной, если производится обработка отверстия, глубина которого не превышает пяти его диаметров. В случаях, когда соотносимая величина становится больше, то такие отверстия относят уже к глубоким отверстиям.

В случае обработки глубоких отверстий сложность технологического процесса обусловлена наличием длинной механической

магистрали (стебля, сверлильной трубы), воспринимающей осевые, крутильные и изгибающие нагрузки, одна из схем которого приведена на (рис. 1).

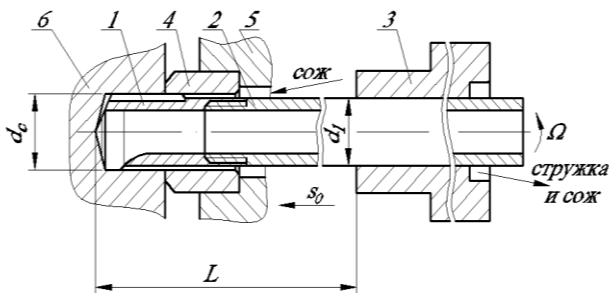


Рис. 1. Схема глубокого сверления отверстий:
1 – головка с режущими и опорными пластинами (колосок), 2 – сверлильная труба, 3 – шпиндель станка,
4 – кондукторная втулка, 5 – суппорт станка,
6 – обрабатываемая деталь

Здесь инструмент, содержащий режущую головку 1, закрепленную с помощью резьбы на сверлильной трубе 2, размещается в шпинделе 3 станка, совершающем одновременно вращение и поступательное движение, не обязательно взаимосвязанные.

Перед началом работы подвижный суппорт станка центрируют так, чтобы ось направляющей втулки 4 совпала с координатой осью отверстия детали 6. После этого последовательно включаются подача смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), вращение шпинделя и его осевая подача s_0 . СОЖ, попадая в зону резания через каналы между направляющей втулкой и режущей головкой, смазывает, охлаждает и выталкивает стружку во внутренний канал сверлильной трубы, выпадающую затем в стружкоприемник. Возникающая при этом проблема функционирования удаленной от шпинделя режущей части, особенно осложняется ее неравномерным вращением, переменной упругостью магистрали, меняющимся моментом и силой резания, прецессионным колебанием оси вращения и продольным колебанием режущей части инструмента, приводящим к огранкам, значительным отклонениям (уводам), потери размерной точности и пр. [1, 2, 3].

Для всех способов обработки, в той или иной степени, характерны следующие особенности:

- имеет место удаление (в некоторых

случаях значительное) режущей части инструмента от шпинделя станка;

- базирование опорных элементов головки инструмента осуществляется на обработанную поверхность отверстия;

- принудительный отвод стружки из зоны резания осуществляется в основном потоком смазочно-охлаждающей жидкости.

В связи с этим возникает необходимость в дополнении современной теории сверления глубоких отверстий, которая в совокупности должна охватывать значительный круг вопросов таких, как резание, теплопередача, динамика, остаточные напряжения и др. Остановимся на динамическом аспекте процесса сверления.

В последние годы выполнен ряд работ, развивающих представление о динамических процессах при сверлении глубоких отверстий, к примеру [4-10]. Это связано с возрастающей потребностью машиностроения в изготовлении качественных отверстий. В большинстве опубликованных работ рассматриваются отдельные вопросы, пренебрегающие влиянием тех или иных факторов. Этим можно объяснить частую необходимость выполнения экспериментов по выбору режимов резания даже при незначительном изменении параметров процесса. Однако и здесь есть неосвещенные вопросы, связанные с образованием и отводом стружки из отверстия, соотношением между крутильными и продольными колебаниями режущей части, деформацией стебля и пр.

Так, например, для определения усилий на режущих кромках инструмента обычно используют известные уравнения, полученные в результате аппроксимации экспериментальных данных, в которых заданными переменными являются непосредственно параметры резания (глубина резания, подача, размеры обработки) [10]. Такой подход не может быть применим для технологии изготовления глубоких отверстий, поскольку сложность процесса обработки глубоких отверстий обусловлена наличием длинной механической магистрали, воспринимающей осевые, крутильные и изгибающие нагрузки. Отсюда возникает необходимость в проведении комплексного анализа всех силовых

факторов и дальнейшей математической формализации процесса резания.

Во время сверления на качество процесса резания, кроме параметров инструмента, большое влияние оказывает скорость движения режущей части головки инструмента, нормальные и касательные напряжения сечения сверлильной трубы (стебле, колонне труб) [2]. В механике для описания крутильных колебаний обычно применяют дифференциальное уравнение в частных производных [11, 12]

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2},$$

где φ – угловое перемещение сечения; t – время; G – модуль сдвига; ρ – плотность материала x – продольная координата.

В конечном итоге это уравнение связывает перемещения входной и выходной координат. Однако исследования данного процесса удобней проводить на основе метода, предложенного Л.А. Кондратенко [5]. Данный метод позволяет учитывать не только перемещение, но и напряжение, возникающее в силовой магистрали (стебле). Такой подход дает возможность исследовать динамические явления на основе методов теории автоматического управления с использованием обобщенной модели инерционного диска, вращающегося на конце стрежня. Изложению этого вопроса посвящены работы [12-14].

Из уравнения момента количества движения в дифференциальной форме можно получить уравнение [12]

$$r\rho \frac{\partial \Omega}{\partial t} = -\frac{\partial \tau}{\partial x},$$

где Ω – скорость перемещений сечения стержня, $\Omega = \partial \varphi / \partial t$; r – радиус стержня; τ – максимальное касательное напряжение в сечении стержня; x – координата перемещения режущего инструмента.

Приведем систему уравнений, которая позволяет описать изменения напряжения и скоростей движения элементарных участков стержня [13]

$$rG \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\frac{\partial \tau}{\partial x}, \quad rG \frac{\partial \Omega}{\partial x} = -\frac{\partial \tau}{\partial t}. \quad (1)$$

Запишем систему уравнений (1) в изображениях по Лапласу, не рассматривая при этом потери на вязкое трение и предполагая, что плотность и модуль сдвига постоянны

$$r\rho s \Omega(s) = -\frac{d\tau(s)}{dx}, \quad \frac{s\tau(s)}{rG} = -\frac{d\Omega(s)}{dx}. \quad (2)$$

Здесь s – комплексная переменная.

После проведения преобразований и введения гиперболических функций решением (2) будет

$$\begin{aligned} \tau(s, x) &= \tau_1(s, 0) \operatorname{ch}[\theta(s)x] - \\ &\quad - \frac{G\theta(s)}{s} \cdot \Omega_1(s, 0) \operatorname{sh}[\theta(s)x], \\ \Omega(s, x) &= \Omega_1(s, 0) \operatorname{ch}[\theta(s)x] - \\ &\quad - \frac{s}{G} \cdot \frac{\tau_1(s, 0) \operatorname{sh}[\theta(s)x]}{\theta(s)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициент $\theta(s)$ является операторным коэффициентом распространения волн.

Принимая конечную длину магистрали l (рис. 1), и предполагая, что подводимый к сверлильной трубе момент количества движения полностью расходуется в нагрузке, дополним систему этих уравнений (3) следующими краевыми условиями [13]

$$\begin{aligned} \Omega(s, 0) &= \Omega_1(s), \quad \Omega(s, l) = \Omega_2(s); \\ \tau(s, 0) &= \tau_1(s), \quad \tau(s, l) = \tau_2(s); \\ \tau_2(s) &= \frac{M_c(s) + h_k \Omega_2(s) + J s \Omega_2(s)}{W_p}. \end{aligned} \quad (4)$$

где M_c – момент сопротивления на выходном конце трубы длиной l ; Ω_1, Ω_2 – угловые скорости вращения входного и выходного концов трубы; τ_1, τ_2 – максимальные касательные напряжения на соответствующих концах силового участка сверлильной трубы; h_k – коэффициент потерь на трение; W_p – геометрический полярный момент сопротивления сечения трубы, примыкающего к режущей головке; J – маховой момент инерции режущей головки, приведенный к ведомому концу трубы.

Из совместного алгебраического решения (3) и (4) получим

$$\begin{aligned} \Omega_2(s) [1 + h_k \mathcal{G}_k(s) + J \mathcal{G}_k(s)^2] &= \\ &= \frac{\Omega_1(s)}{\operatorname{ch}[\theta_k(s)l]} - M_c(s) s \mathcal{G}_k(s), \end{aligned}$$

$$\tau_2(s) = \frac{1}{W_p} \cdot \left\{ M_c(s) + \frac{\Omega_1(s)}{ch[\theta_k(s)l]} \right\} \times \frac{h_k + Js}{1 + h_k \mathcal{G}_k(s)s + J \mathcal{G}_k(s)s^2}. \quad (5)$$

где $\mathcal{G}_k$ – функция крутильной упругости

$$\mathcal{G}_k(s) = \frac{l}{GrW_p} Z_k(s); Z_k(s) = \frac{th[\theta_k(s)l]}{\theta_k(s)l}. \quad (6)$$

В ходе проведенных преобразований мы получили новую комплексную функцию $Z_k(s)$, которая характеризует степень распределенности параметров процесса. Данная функция становится вещественной при введении параметра α_k , который определяет свойства конструкции силовой магистрали. Более подробное изложение данного вопроса приведено в работах [2, 3, 13].

Уравнения (4), (5), (6) дают возможность рассчитать частотные характеристики привода, т.е. определить реакцию привода на гармоническое изменение скорости движения ведущего звена или момента сопротивления, действующего на головку инструмента при согласованной нагрузке, когда подводимый к системе момент количества движения полностью расходуется в нагрузке.

Приведем графики расчетных частотных характеристик сверла ВТА (Boring and Trepanning Association) диаметром 16,3 мм при длине силового участка сверлильной трубы 1000 мм, наружном диаметре 15 мм, толщине стенки 1,5 мм, крутильной податливости $\mathcal{G}_0 = 4,26 \cdot 10^{-6} [\text{Нмм}]^{-1}$, коэффициенте потерь на трение $h = 1$ Нммсек, значении махового момента инерции головки $J = 3,09 \cdot 10^{-3} [\text{Нммсек}^2]$, рис. 2 и 3 [13].

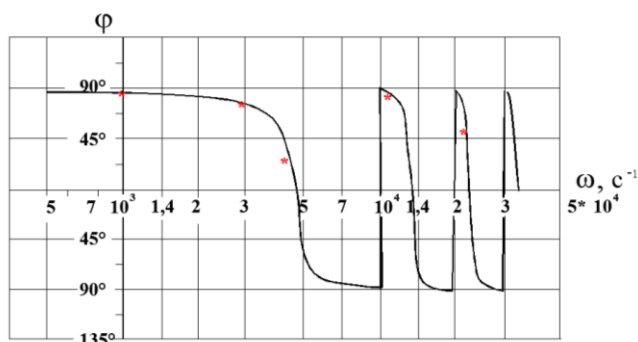


Рис. 2. Фазочастотная характеристика сверла ВТА

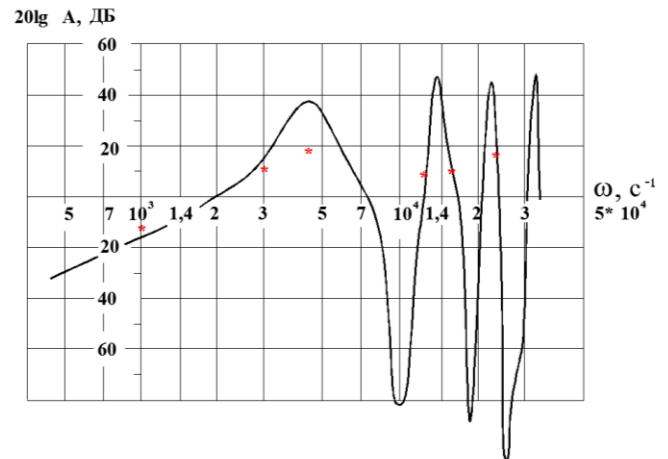


Рис. 3. Амплитудочастотная характеристика сверла ВТА

Очевидно, что механический привод, включающий шпиндель, сверлильную трубу, режущую часть, периодически попадает в резонансные режимы при частотах $\omega_p = 4396; 13330; 22510 \dots \text{с}^{-1}$. Число таких режимов, как в обычной упругой системе, бесконечно.

Изложенные приемы позволяют изучать колебания скорости вращения головки сверла и напряжений в стебле (сверлильной трубе) различной протяженностью, оценивать влияние параметров процесса в технологиях глубокого сверления, а также выбирать рациональные режимы работы и конструкцию инструмента.

Такой подход наиболее важен для получения глубоких отверстий высокого качества в узлах крепления теплообменных труб, обеспечивающих при заданных режимах закрепления труб требуемые параметры неразъемных трубных соединений.

Список литературы

1. Терехов В.М., Кондратенко Л.А. О математической модели процесса сверления глубоких отверстий. / Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1999. – № 1. – С.55-61.
2. Кондратенко Л.А. Колебания и методы управления скоростью движения технологических объектов. – М.: МГОУ, 2005, 448с.
3. Терехов В.М., Кондратенко Л.А., Миронова Л.И. Некоторые динамические особенности взаимодействия режущей части ружейного сверла с деталью. / Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – №4. – С. 78 – 84.
4. Messaoud Amor, Weis Claus. Monitoring a deep holl drilling process bu nonlinear time series model-

- ing. J. Sound and Vibration. 2009. 326, №3-5, pp. 620-630.
5. Кондратюк О. А. Об устойчивости процесса глубокого сверления на малых агрегатных станках. Оборудование и инструмент для профессионалов. 2005, №6, с. 22-23.
6. Лакирев С.Г., Дерябин И.П., Миронова И.Н. Моделирование обработки отверстий ружейными сверлами и развертками. Материалы МОНПК «Снежинск и наука», СФТИ, 2000, с. 107-108.
7. Ефимович И.А. Динамика сил резания в процессе врезания. Вестник машиностроения, 2003, №2, с. 45-47.
8. Astachov V. Gundrilling Know-How. Gutt. Tool Engineering, 2001, 53 n 12, p.p. 34-38. Weinert K., Peters C., Wittkop S. Finite Elemente optimieren lange Bohrer Technika 2004 (9), S. 8-12.
9. Mustafa Gunay, Ulvi Seker and Gokhan Sur. Design and construction of a dynamometer to evaluate the influence of cutting tool rake angle on cutting forces. Materials and Design, 2006, Vol. 27, pp 1097-1110. 11.
10. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. – М.: Высшая школа, 1985, 304с.
11. Weinert K., Peters C., Wittkop S. Finite Elemente optimieren lange Bohrer Technika 2004 (9), pp. 8-12.
12. Кондратенко Л.А., Терехов В.М., Миронова Л.И. Об одном методе исследования крутильных колебаний стержня и его применении в технологиях машиностроения / Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2017. – № 1. – С. 133 – 137.
13. Kondratenko L., Mironova L., Terekhov V. Investigation of vibrations during deepholes machining. 25th International Conference Vibroengineering, Liberec, Czech Republic. Vibroengineering Procedia. 2017, Vol. 11, pp.7-11. doi. 10.21595/vp.2017.18285. (Исследование колебаний при сверлении глубоких отверстий)
14. Kondratenko L., Mironova L., Terekhov V. On the question of the relationship between longitudinal and torsional vibrations in the manufacture of holes in the details. 26th Conference in St. Petersburg, Russia. Vibroengineering Procedia. 2017, Vol. 12, pp. 6-11. doi 10.21595/vp.2017.18461.
15. Бабаков И. М. Теория колебаний. – М.: ГТТЛ, 1958, 628 с.
3. Terekhov V.M., Kondratenko L.A., Mironova L.I. Some dynamic features of interaction the cutting part of the gun drill with the detail. *Nekotorye dinamicheskie osobennosti vzaimo-dejstviya rezhushchej chasti ruzhejnogo sverla s detal'yu*. Engineering & Automation Problems, no. 4, 2016, pp. 78-84..
4. Messaond Amor, Weis Claus. Monitoring a deep holl drilling process bu nonlinear time series modeling. J. Sound and Vibration. 2009. 326, №3-5, pp. 620-630.
5. Kondratyuk O. A. The stability of the deep hole drilling process on small rotary indexing machines. *Ob ustojchivosti processa glubokogo sverleniya na malyh agregatnyh stankah*. Equipment and tools for professionals, no 6, 2005, pp. 22-23.
6. Lakirev S.G. Deryabin I.P. Modelirovaniye obrabotki otverstiy ruzheynymi sverlami i razvertkami. *Modelirovanie obrabotki otverstij ruzheynymi sverlami i razvertkami*. Materialy MONPK «Snezhinsk and nauka», SFTI, 2000, pp. 107-108.
7. Yefimovich I.A. Dynamics of cutting forces during insertion. *Dinamika sil rezaniya v processe vrezaniya*. Journal of Mechanical Engineering, 2003, no. 2, pp. 45-47.
8. Astachov V. Gundrilling Know-How. Gutt. Tool Engineering, 2001, 53 n 12, p.p. 34-38. Weinert K., Peters C., Wittkop S. Finite Elemente optimieren lange Bohrer Technika 2004 (9), pp. 8-12.
9. Mustafa Gunay, Ulvi Seker and Gokhan Sur. Design and construction of a dynamometer to evaluate the influence of cutting tool rake angle on cutting forces. Materials and Design, 2006, Vol. 27, pp 1097-1110. 11.
10. Granovsky G.I., Granovsky V.G. Metal cutting. *Rezanie metallov*. Moscow, The higher school, 1985.
11. Weinert K., Peters C., Wittkop S. Finite Elemente optimieren lange Bohrer Technika 2004 (9), pp. 8-12.
12. Kondratenko L.A., Terekhov V.M., Mironova L.I. About one method of research torsional vibrations of the core and his application in technologies of mechanical engineering. *Ob odnom metode issledovaniya krutil'nyh kolebanij sterzhnya i ego primeneni v tekhnologiyah mashinostroeniya*. Engineering & Automation Problems. 2017, No. 1, pp. 133-137.
13. Kondratenko L., Mironova L., Terekhov V. Investigation of vibrations during deepholes machining. 25th International Conference Vibroengineering, Liberec, Czech Republic. Vibroengineering Procedia. 2017, Vol. 11, pp.7-11. doi. 10.21595/vp.2017.18285. (Исследование колебаний при сверлении глубоких отверстий)
14. Kondratenko L., Mironova L., Terekhov V. On the question of the relationship between longitudinal and torsional vibrations in the manufacture of holes in the details. 26th Conference in St. Petersburg, Russia.
15. Babakov I.M. Theory of oscillations. *Teoriya kolebanij*. GTTL, Moscow, 1958.

References

1. Terekhov V.M., Kondratenko L.A. A mathematica model of the process of drilling deep holes. *O matematicheskoy modeli processa sverleniya glubokih otverstij*. Journal of machinery manufacture and reliability, no 1, 1999, pp. 55-61.
2. Kondratenko L. A. Vibrations and speed regulation methods of movement of technological objects. *Kolebaniya i metody upravleniya skorost'yu dvizheniya tekhnologicheskikh ob'ektov*. Moscow, MRSU, 2005.

УДК 621.758;537.622

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ТЕРМОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.Н. Драгошанский¹, В.И. Пудов¹*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

Аннотация

На магнитомягких сплавах на основе кремнистого железа с кристаллической (текстурированный сплав Fe-3%Si) или аморфной (сплавы Fe₈₁Si₇B₁₂, Fe₈₁Si₄B₁₃C₂, Fe₇₈Ni₁Si₉B₁₂, Fe₇₄Si₁₃B₉Nb₃Cu₁) структурой проведено сравнение влияния термомангнитной обработки (ТМО) в постоянных и переменных магнитных полях разной частоты на электромагнитные свойства. Показано, что при оптимальных условиях обработки получено снижение коэрцитивной силы в три раза, магнитных потерь в полтора раза и увеличения начальной магнитной проницаемости в восемь раз, по сравнению с аналогичными характеристиками сплавов, полученными без ТМО. Локальная лазерная обработка лент магнитомягких сплавов, прошедших ТМО, дополнительно на 5-8% снижает магнитные потери.

Ключевые слова: анизотропная электротехническая сталь, аморфные сплавы, термомангнитная обработка, лазерная обработка, магнитные свойства.

INFLUENCE OF HIGH-FREQUENCY THERMOMAGNETIC TREATMENT ON ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF AMORPHOUS AND POLYCRYSTALLINE MATERIALS

Yu.N. Dragoshanskii¹, V.I. Pudov¹*¹Institute of Metal Physics M.N. Miheeva, UrB, RAS, Ekaterinburg, Russian Federation*

Abstract

The effect of thermomagnetic treatment (TMT) in constant and variable magnetic fields of different frequencies on electromagnetic properties is compared on soft magnetic alloys based on silicon with crystalline (textured alloy Fe-3% Si) or amorphous (alloys Fe₈₁Si₇B₁₂, Fe₈₁Si₄B₁₃C₂, Fe₇₈Ni₁Si₉B₁₂, Fe₇₄Si₁₃B₉Nb₃Cu₁) structures. It is shown that under optimal processing conditions, a decrease in the coercive force by three times, magnet losses by one and a half times and an increase in the initial magnetic permeability by eight times is obtained, compared with similar characteristics of alloys obtained without TMO. Local laser processing of tapes magnetic alloys that have passed the TMO, in addition to 5-8% reduces the magnetic losses.

Keywords: Anisotropic electrotechnical steel, amorphous alloys, thermomagnetic treatment, laser treatment, magnetic properties

В магнитомягких сплавах – в поликристаллической анизотропной электротехнической стали (АЭС – ленты сплава Fe-3%Si с одноосной ребровой кристаллографической текстурой (110) [001]) и в тонких аморфных лентах на основе железа, например в сплаве Fe₈₁Si₇B₁₂, одним из способов улучшения электромагнитных характеристик является термомангнитная обработка (ТМО) [1,2]. Она заключается в нагреве и охлаждении материала в присутствии внешнего магнитного

поля [3,4]. При этом для обеднённого кремнием сплава Fe-3%Si в постоянном магнитном поле индуцируется дополнительная одноосная магнитная анизотропия за счет образования в решётке α-Fe вкраплений кластеров с B2 атомным упорядочением пар примесных атомов Si-Si, окружённых растянутыми ячейками Fe-ОЦК матрицы [5]. Анизотропная форма кластеров, более протяжённых вдоль оси лёгкого намагничивания [001], ближайшей к направлению поля,

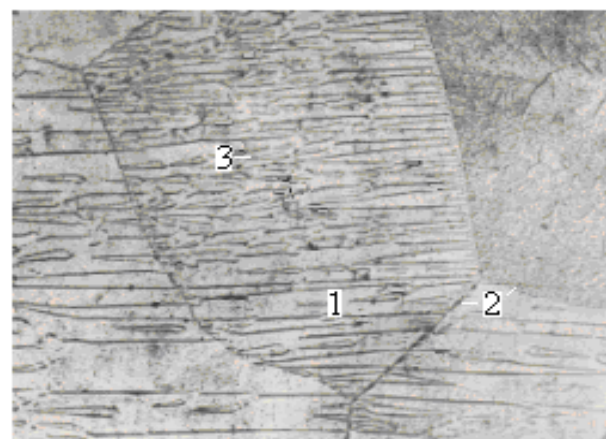
приводит к соответствующей перестройке доменной структуры с уменьшением объёма поперечно намагниченных доменов, повышению остаточной магнитной индукции и прямоугловатости петли магнитного гистерезиса и к снижению магнитных потерь.

Другой вид ТМО – нагрев и охлаждение материала в присутствии переменного магнитного поля, приводит также и к снятию стабилизации доменной структуры, неизбежно возникающей в материале, когда в процессе его изготовления каждый домен охлаждался в поле собственной намагниченности и поэтому образец в целом подвергался локальной ТМО. Снятие этого эффекта последующей ТМО в переменном магнитном поле уменьшало эту локальную анизотропию в зёрнах стали, облегчая в более однородном материале смещение доменных границ при перемагничивании. Такую ТМО в переменном магнитном поле обычно проводят при использовании промышленной частоты 50-60 Гц [6].

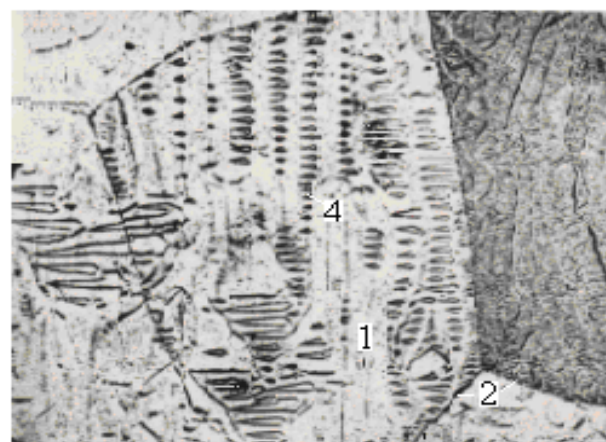
Наиболее эффективна терромагнитная обработка повышенной частоты, например, при 40-80 кГц [7,8]. При этом с ростом частоты переменного поля при обработке в образце резко возрастают вихревые токи, для сдерживания роста которых дробится полосовая структура 180° доменов. В результате этих процессов после высокочастотной ТМО ширина полосовых доменов существенно уменьшается, в процессе обработки и в остаточном намагниченном состоянии. Это приводит к меньшим скоростям движения доменных границ и к меньшим магнитным потерям в образце при перемагничивании.

Ленты сплава Fe-3%Si с одноосной ребровой кристаллографической текстурой (110) [001], вырезанные вдоль направления прокатки, совпадающего с осью магнитной текстуры, имели ширину 30 мм и стандартные толщины 0.23, 0.27, 0.30, 0.35 мм [9]. Ленты магнитомягких аморфных сплавов на основе железа составов $\text{Fe}_{78}\text{Ni}_1\text{Si}_9\text{B}_{12}$ (2НСП), $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{C}_2$ и $\text{Fe}_{81}\text{Si}_7\text{B}_{12}$ имели ширину 5 мм и толщину 0,02 мм. ТМО выполняли при температуре $\sim 400^\circ\text{C}$ в магнитном поле напряжённостью 1,4 кА/м при различных частотах в диапазоне 0-40 кГц. Магнит-

ную доменную структуру наблюдали с помощью метода магнитных суспензий или магнитооптического эффекта Керра. Магнитные потери в лентах стали измеряли при индукции 1.0–1.7 Тл и частоте перемагничивания 50–400 Гц (например, $P_{1.5/50}$, Вт/кг), в аморфных лентах – при $P_{1.0/400}$, на магнитоизмерительной установке МК 4Э в замкнутой магнитной цепи, для образцов малой массы [10].



а



б

Рис. 1. Изменение магнитной анизотропии и ориентации доменов типа А в домены типа Б при изменении ориентации постоянного магнитного поля при ТМО стали Fe-3%Si. а – магнитное поле направлено вдоль оси [001], б – направлено поперек оси [001]. 1 - кристаллическое зерно, 2 - межзеренные границы, 3,4 - основные полосовые домены 180° структуры типа А и 90° структуры типа Б соответственно

Результаты исследования показывают, что ТМО в постоянном магнитном поле наводит более сильную магнитную анизотропию, чем ТМО в переменном поле, поэтому в случае перемагничивания материала

поперёк оси [001] текстуры вызывает даже перестройку исходных 180° доменов структуры типа А с намагниченностью вдоль оси [001] в структуру поперечных 90° доменов типа Б с намагниченностью вдоль поперечных осей лёгкого намагничивания [010] или [100], более близких, чем исходное, к направлению приложенного поля (рис.1).

Так как энергия естественной кристаллографической анизотропии на два порядка выше индуцированной ТМО магнитной анизотропии, то в результате ТМО намагниченность основных доменов, и их 180° границ не следует строго за направлением поля при обработке как это было принято ранее [11]. Они оказываются ориентированными вдоль одной из осей лёгкого намагничивания, ближайшей к направлению поля при ТМО.

Таблица 1. Магнитные потери в стали Fe-3%Si при ТМО в продольных переменном и постоянном полях

Тип стали	P _{1,0/50} , Вт/кг		ΔP/ P, %	P _{1,0/50} , Вт/кг	ΔP/P %
	От- жиг	~ТМО		=ТМО	
Изо- троп.	0, 78	0,58	-26	0,59	-23
Анизо- троп 0°	0,48	0,44	-8	0,43	-10
Анизо- троп 90°	1,12	0,79	-30	0,79	-30
Моно- крист 90°	1,17	0,90	-23	0,88	-25

Результаты снижения магнитных потерь в лентах сплава Fe-3%Si с различным видом кристаллической анизотропии, подвергнутых ТМО в переменном и постоянном магнитных полях, показаны в табл. 1.

Из таблицы видно, что в результате ТМО магнитные потери у всех образцов снизились. В образцах изотропной электротехнической стали – на 25%, анизотропной стали, вырезанных вдоль направления текстуры – на 9%, вырезанных перпендикулярно – на 23–30% (в моно- и поликристаллах соответственно).

Обнаружено, что в результате дестабилизации доменной структуры при ТМО в

переменном поле магнитные потери снижаются одновременно по всем направлениям в плоскости листа, в то время как при ТМО в постоянном поле они снижаются лишь в направлении поля, действовавшего при ТМО.

На (рис. 2) представлена зависимость относительного изменения магнитных потерь $\Delta P/P$ % (изменение потерь после ТМО с частотой изменения магнитного поля 80 кГц, по отношению к потерям, измеренным после отжига без поля) от частоты поля при измерении уже обработанных образцов, например, сплава Fe₈₁Si₇B₁₂.

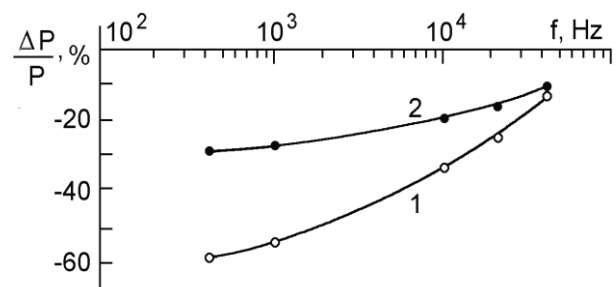


Рис. 2 Частотная зависимость относительного изменения магнитных потерь, измеренных при индукции 0,5 Тл в ленточных образцах аморфного сплава Fe₈₁Si₇B₁₂ после применения ~ТМО (1) и =ТМО (2)

Видно, что во всем исследованном диапазоне частот перемагничивания (400 Гц–40 кГц) ТМО в переменном поле дает существенно больший эффект снижения потерь, по сравнению с ТМО в постоянном поле, а начальная магнитная проницаемость увеличивается втрое (с 3500 до 10800 ед.).

По сравнению со стальными образцами, в аморфной ленте был получен более высокий результат снижения магнитных потерь, составляющий 30–40% (таблица 2), что обусловлено меньшей толщиной ленты и большей шириной её доменов в исходном состоянии [12]. На вышеуказанных поликристаллических и аморфных образцах были получены высокие результаты с применением комплекса обработок: ТМО + ЛЛО. ЛЛО – локальная лазерная обработка, создающая узкие зоны тепловой деформации, ориентированные поперёк оси текстуры с промежутками ~5 мм. Она обеспечивает значительное в 3–4 раза уменьшение ширины основных полосовых 180° доменов, скоростей движе-

ния их границ, вихретоковых и полных магнитных потерь [13,14].

Таблица 2. Магнитные свойства аморфного сплава $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{C}_2$ после различных обработок

Виды обраб.	μ_0	μ_{max}	H_c , А/м	B_r , Тл	$P_{1,0/400}$, Вт/кг
Отжиг без H	3500	65000	5	0,77	2,1
ТМО в =H	4600	150000	4,0	0,91	0,91
	30%	130%	-20%	18%	18%
ТМО в H~50Гц	6000	280000	2,3	0,85	1,5
	70%	330%	-54%	10%	-29%
ТМО в H~80Гц	33000	600000	1,8	0,70	1,2
	990%	820%	-64%	-10%	-43%
ТМО+ЛЛО	4800	180000	3,2	0,56	1,3
	37%	177%	-36%	-17%	-38%

В процентах указаны изменения магнитных характеристик материала от их исходных величин (в состоянии после отжига).

В частности, вдоль оси текстуры стали (оси легкого намагничивания), вдоль которой в основном используется её перемагничивание в магнитопроводах, снижение потерь $P_{1,5/50}$ достигало 22–27% в зависимости от степени совершенства текстуры (в исходном состоянии образцы имели характеристику B_{2500} равную 1,92–1,94 Тл). Снижение магнитных потерь целиком происходит за счёт их вихретоковой составляющей.

Таблица 3. Полные магнитные потери $P_{1,5/50}$ и составляющие - гистерезисные P_r , вихретоковые P_v в стали Fe-3%Si после обработок, включая комплексную

Потери Вт/кг	Виды обработки				
	Исх	~ТМО	ЛЛО	ТМО+ЛЛО	$\Delta P/P$, %
$P_{1,5/50}$	0,68	0,58	0,54	0,50	-26
P_r	0,24	0,21	0,26	0,25	+ 4
P_v	0,44	0,37	0,28	0,25	-43

Эффект от применения самой локальной лазерной обработки составлял в лентах стали и её магнитопроводах 8–15% [15,16].

Таким образом, абсолютные величины магнитных характеристик, достигнутые в кристаллических (таблица 1) и аморфных (таблица 2) сплавах после различных видов обработок, показывают высокую эффективность ТМО и ЛЛО для улучшения магнитных свойств магнитомягких сплавов на основе железа. Исследовано влияние различ-

ного вида термомагнитных обработок и выявлены области эффективного применения каждого из них. В частности, показано, что для тончайших лент ферромагнитных сплавов (ленты сплавов на основе железа с аморфной структурой) наиболее эффективной является высокочастотная термомагнитная обработка.

Обнаружено, что в результате ТМО в переменном магнитном поле вдоль какого-либо направления магнитные потери снижаются одновременно по всем направлениям в плоскости ферромагнитной ленты. Установлено, что комбинированное воздействие последовательно двух деформационно-текстурирующих обработок – ТМО и ЛЛО, хотя и не является аддитивным, но, обладая разными механизмами влияния на доменную структуру сплавов, суммарно обеспечивают значительное улучшение электромагнитных свойств магнитомягких материалов. Эти обработки, встроенные в технологический цикл производства рулонных сплавов перспективны для широкого использования.

Работа выполнена в рамках ГЗ по темам «Магнит» №АААА-А18-118020290129-5, «Диагностика» №АААА-А18-118020690196-3 и частично проекта УрО РАН №18-10-2-8.

Список литературы

1. Шулика В.В. Об анизотропии эффекта термомагнитной обработки в электротехнических сталях / В.В. Шулика, И.Е. Старцева, В.К. Чистяков, Ю.Н. Драгошанский // Физика металлов и металловедение. – 1988. – Т. 66. – №4. – С. 667-673.
2. Пудов В.И. Термостабилизация деформационных зон лазерного воздействия в условиях ТМО Fe-3%Si сплавов / В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский // Актуальные проблемы прочности: труды LVII Международной научной конф. Севастополь, 2016. – С. 41-42.
3. Грэхем Ч. Термомагнитная обработка. В.кн.: Магнитные свойства металлов и сплавов. – М.: ИИЛ, 1961. – С. 374-441.
4. Пудов В.И., Драгошанский Ю.Н., Соболев А.С. Способ термомагнитной обработки магнитопроводов // Патент России № 2510661. 2014. Бюл. №10.
5. Ershov N.V. The structural origin of induced magnetic anisotropy in 6-Fe_{1-x}Si_x (x=0.05-0.08) alloys / N.V. Ershov, Yu.P. Chernenkov, V.A. Lukshina, V.I. Fedorov, B.K. Sokolov // Physica B. – 2006. – V.372. – P. 152-155.
6. Старцева И.Е. Индуцированная магнитная анизотропия железо-кремнистых сплавов и её влияние на доменную структуру и магнитные свой-

- ства / И.Е. Старцева // Сборник статей: Физические свойства магнитных материалов. – Свердловск: УНЦ АН СССР. – 1982. – С. 15-19.
7. Драгошанский Ю.Н. Способ высокочастотной термомагнитной обработки магнитомягких материалов // Патент России № 2025504. 1994. Бюл. №24.
 8. Драгошанский Ю.Н. Новые способы оптимизации магнитной анизотропии электротехнических лент / Ю.Н. Драгошанский, В.В. Шулика, А.П. Потапов // Сталь. – 1996. – №3. – С. 58-61.
 9. ГОСТ 21427.1–83. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонко листовая. – М.: Госкомстандарт. – 1983. – С. 1-17.
 10. Драгошанский Ю.Н. Улучшение доменной структуры и свойств магнитомягких сплавов при модификации их поверхности / Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – №3. – С. 44-52.
 11. Шур Я.С. Влияние ТМО на распределение доменов ферромагнитного монокристалла / Я.С. Шур // ДАН СССР. – 1938. – Т. 21. – №1-2. – С. 18-20.
 12. Nozawa T., Mizogami M., Mogi H., Matsuo Y. Magnetic properties and dynamic domain behavior in α -oriented 3% Si-Fe // IEEE Trans. Mag. Magn. – 1996. – V. 32. – №2. – P. 572-589.
 13. Соколов Б.К. Структурные барьеры и снижение магнитных потерь в анизотропных электротехнических сталях / Б.К. Соколов, Ю.Н. Драгошанский // ФММ. – 1991. – №1. – С. 92-102.
 14. Драгошанский Ю.Н. Влияние лазерной обработки и неорганических магнитоактивных покрытий на динамические магнитные свойства магнитомягких материалов / Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов // Неорганические материалы. – 2013. – Т. 49. – №7. – С. 714-722. DOI: 10.7868/S0002337X13070026.
 15. Драгошанский Ю.Н. Оптимизация доменов и снижение магнитных потерь электротехнической стали активным покрытием и лазерной обработкой / Ю.Н. Драгошанский, В.И. Пудов, Л.С. Каренина // Известия РАН. Сер. физическая. – 2013. – Т. 77. – №10. – С. 1495-1498. DOI:10.7868/S0367676513100104.
 16. Пудов В.И. Формирование магнитной доменной структуры и свойств магнитопроводов в условиях упорядоченных лазерных деформаций / В.И. Пудов, Ю.Н. Драгошанский // Доклады академии наук. Серия техническая физика. – 2017. – Т. 476. – №1. – С. 26-29. DOI: 10.7868/S0869565217250065.
- ## References
1. Shulika V.V. Anisotropic effect of thermomagnetic treatment in electric steel / V.V. Shulika, I.E. Startceva, V.K. Chistiakov, Yu.N. Dragoshanskii // Phys. Met. Metallogr. – 1988. – V.66. – №4. – P.667-673
 2. Pudov V.I. Thermo-stabilization of zone deformation of laser irradiation at the thermo-magnetic treatment of Fe-3%Si alloys / V.I. Pudov, Yu.N. Dragoshanskii // Actual problems of solidly: Proceedings of LVII Intern. conf. Sevastopol, 2016. – P. 41-42.
 3. Graham Ch. Thermo-magnetic treatment // In book: Magnetic properties of metal and alloys. – M.: IIL. 1961. – P. 374-441.
 4. Pudov V.I., Dragoshanskii Yu.N., Sobolev A.S. Method thermo-magnetic treatment of transformer cores // Patent Russia №2510661. 2014. Bull. №10.
 5. Ershov N.V. The structural origin of induced magnetic anisotropy in δ -Fe_{1-x}Si_x (x=0.05-0.08) alloys / N.V. Ershov, Yu.P. Chernenkov, V.A. Lukshina, V.I. Fedorov, B.K. Sokolov // Physica B. – 2006. – V.372. – P. 152-155.
 6. Startceva I.E. The induced magnetic anisotropy of Fe-Si alloys and their influence on domain structure and magnetic properties // Proceedings «Physical properties of the magnetic materials». Sverdlovsk: UrSC AS SSSR. – 1982. – P. 15-19.
 7. Dragoshanskii Yu.N. Method of high-frequency thermo-magnetic treatment of soft magnetic materials // Patent Russia №2025504. 1994. Bull. №24.
 8. Dragoshanskii Yu.N. Potapov A.P. New method of optimization of magnetic anisotropic of electric ribbons / Yu.N. Dragoshanskii, V.V. Shulika // Steel. – 1996. – №3. – P. 58-61.
 9. GOST 21427.1– 83. Steel electro-technic cold-rolling anisotropy thin-ribbon – M: State Com. Standart. – 1983. – P. 1-17.
 10. Dragoshanskii Yu.N. Improvement of domain structure and properties of soft magnetic alloys at modification their surface / Yu.N. Dragoshanskii, V.I. Pudov // Physics and chemical of materials treatment. 2013. – №3. – P. 44-52.
 11. Shur Y.S. Influence TMT on distribution of ferromagnetic monocrystal domains / Y.S. Shur // Doklady Physics. – 1938. – V.21. – №1-2. P. 18-20.
 12. Nozawa T., Mizogami M., Mogi H., Matsuo Y. Magnetic properties and dynamic domain behavior in grain-oriented 3% Si-Fe // IEEE Trans. Mag. Magn. – 1996. – V. 32. – №2. – P. 572-589.
 13. Sokolov B.K. Magnetic-structure zones and reducing of core losses in anisotropic electrical steel / B.K. Sokolov, Yu.N. Dragoshanskii // Phys. Met. Metallogr. – 1991. – №1. – P. 92-102.
 14. Dragoshanskii Yu.N. Effect of laser treatment and inorganic magnetic-active coating on dynamic magnetic properties of soft magnetic materials Dragoshanskii Yu.N., Pudov V.I. // Inorganic materials. –2013. – V.49. – №7. – P. 669-676. DOI:10.1134/S0020168513070029.
 15. Dragoshanskii Yu.N. Optimizing the domains and reducing the magnetic losses of electrical steel via active coating and laser treatment / Yu.N. Dragoshanskii, V.I. Pudov, L.S. Karenina // Bulletin of the Russian academy of sciences: Physics. – 2013. – V.77. – № 10. – P.1286-1288. DOI:10.3103/S1062873813100080
 16. Pudov V.I., Dragoshanskii Yu.N. Formation of the magnetic domain structure and properties of magnetic cores under conditions of ordered laser deformations / V.I. Pudov, Yu.N. Dragoshanskii // Doklady Physics. Technical physics. – 2017. – V.62. – №9. P. 411-414. DOI: 10.1134/S1028335817090026.

УДК 666.3.022.2, 666.3.032

ПЛОТНАЯ УПАКОВКА ПОЛИФРАКЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Смирнов¹, С.Г. Пономарев¹, А.А. Васин¹¹ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В статье описаны результаты теоретических и экспериментальных исследований методов получения порошковых засыпок и прессовок с относительной плотностью более 0,5 путем регулирования фракционного состава. Для достижения обозначенной плотности использовался метод подбора фракционного состава порошка корунда сферической формы, основанный на известных теоретических моделях плотных регулярных и случайных упаковок систем полидисперсных сфер. Были выбраны три фракционных состава, расчетная максимальная теоретическая плотность упаковок которых равна 0,824, 0,837 и 0,846. Была проведена оценка степени снижения теоретической плотности порошковой прессовки за счет влияния стен пресс-формы, отклонения реальной структуры упаковки частиц порошка от регулярной плотнейшей, а также за счет отклонения формы реальных частиц порошка от идеальной сферы и влияния характеристик поверхности частиц. Для получения максимальной плотности укладки в экспериментах был использован метод виброуплотнения с механическим осевым давлением. В настоящей работе даны оценки перспектив применения описанных методов в технологии изготовления керамических изделий.

Ключевые слова: высокоплотная керамика, корундовая керамика, плотнейшая регулярная упаковка сфер, плотная случайная упаковка сфер, фракционный состав, порошковые материалы.

DENSE PACKING OF POLY-FRACTIONAL POWDER OF CERAMIC MATERIALS

A.V. Smirnov¹, S.G. Ponomarev¹, A.A. Vasin¹¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article describes the results of theoretical and experimental studies of obtaining powder fillings methods with relative density more than 0,5 by adjusting the fractional composition. To achieve the indicated density the method of selecting the fractional composition of corundum spherical shape powder was used based on known theoretical models of regular and random dense packing of polydisperse spheres. Three fractional compositions were chosen, the calculated theoretical max packing density which is equal to 0,824, 0,837 and 0,846. Powder compacts' degree of the theoretical density reduction due to the influence of the walls of the mold was evaluated, the deviation of the real packing structure of powder particles from dense regular and due to the form deviation of real powder particles from a perfect sphere and the influence of the surface characteristics of the particles. To obtain maximum packing density in the experiments the method of vibration compaction with a mechanical axial pressure was used. In the present work the assessment of the application prospects of the described methods in the technology of ceramics production.

Keywords: high density ceramics, corundum ceramics, dense regular packing of spheres, dense random packing of spheres, fractional composition of the powder materials.

Введение

Керамика высокой плотности широко используется во многих областях техники во всем мире. Это обусловлено выгодным комплексом свойств данного типа керамики, а именно: высокой механической прочностью, высокой твердостью, износостойкостью, ог-

неупорностью и химической стойкостью. Многочисленные исследования технологии и эксплуатационных свойств высокоплотной керамики показали, что наиболее подходящей, для большинства областей применения, является высокоплотная (с остаточной пористостью менее 5 %) мелкозернистая структура [1].

При изготовлении изделий из высокоплотной керамики, обладающей обозначенной структурой, необходимо стремиться к получению порошковой прессовки или засыпки с плотностью, как можно более близкой к плотности компактного изделия. Это объясняется тем, что усадка прессовки или засыпки может достигать 40 объемных % [2], что приводит к увеличению припуска на механическую обработку при изготовлении высокоточных изделий. При этом, механическая обработка твердых материалов является весьма трудоемким и затратным процессом.

Повышение плотности укладки порошков

Одним из путей повышения плотности исходной порошковой засыпки или прессовки является подбор такого фракционного состава порошка, который возможно уложить с максимальной плотностью в контейнер (пресс-форму). В настоящей работе для решения данной задачи были применены основные положения теории плотной упаковки твердых сфер, поскольку моделью порошковой прессовки может служить случайная упаковка твердых сфер [3], при условии, что размер частиц порошка на много порядков меньше размера контейнера (пресс-формы) [4].

Упаковка жестких сфер является одной из распространенных задач комбинаторной геометрии о размещении непересекающихся одинаковых жестких сфер в евклидовом пространстве. В своей типичной постановке задача звучит следующим образом: требуется найти такой способ расположения сфер в пространстве, при котором занята наибольшая доля этого пространства [5]. В трехмерном пространстве теоретическая наиболее плотная упаковка сфер одинакового диаметра соответствует регулярной гранецентрированной кубической (ГЦК) упаковке, плотность которой составляет 0,7405 [6].

В реальных условиях любая плотная упаковка жестких сфер одинакового диаметра (по крайней мере, при диаметре сфер выше 100 нм) является случайной, и ее

плотность ϕ не превышает максимальной теоретической плотности регулярной плотнейшей упаковки, т.е.: $\phi < 0,7405$. В большинстве случаев, плотность случайной упаковки твердых сферических частиц равного диаметра находится в диапазоне 0,63...0,66 [7]. Случай монодисперсной упаковки, когда все сферы имеют одинаковый радиус, достаточно подробно изучен как теоретически, так и экспериментально. Менее изученной является задача о плотной укладке полидисперсной системы, когда некоторый объем заполняется твердыми сферическими частицами различных радиусов, и требуется определить, каких размеров частицы и в каком количестве следует взять, чтобы плотность полученной упаковки оказалась наибольшей [8].

Известно несколько работ, где было подробно исследовано влияние фракционного состава полидисперсной смеси сферических частиц на плотность упаковки, как для случая регулярной [9], так и для случайной [10] упаковок. На основе анализа данных работ можно сделать предположение о том, что полученные в работах результаты возможно применять на практике для подбора полифракционного состава с целью получения порошковой засыпки большой плотности. Однако, данное предположение требует экспериментальной проверки.

Постановка задачи

Для оценки возможностей получения засыпок и прессовок керамических порошков высокой плотности за счет регулирования полифракционного состава необходимо:

- выбрать полифракционные составы смеси сферических порошковых частиц на основе аналитических расчетов по методикам, предложенным в работах [9, 10];
- выполнить экспериментальные исследования по укладке выбранных полифракционных смесей порошковых частиц в цилиндрический контейнер с целью определения зависимости плотности укладки от фракционного состава;
- сопоставить расчетные и экспериментальные данные.

Теоретическая часть

Хадсон, в классической работе [9], теоретически решил задачу о том, как более мелкие сферы (радиусом r) могут быть упакованы в пустоты плотнейшей регулярной упаковки (ГЦК) одинаковых сфер большего размера (радиусом R). В данном случае для любого заданного числа N существует максимальный радиус r , такой что N шаров радиуса r могут быть упакованы в каждую октаэдрическую (большую) полость, и n шаров могут быть упакованы в каждую тетраэдрическую (меньшую) полость. Хадсон вывел соотношение r/R для N вплоть до 27 и обнаружил последовательность оптимальных упаковок и связанных с ними максимальных значений коэффициентов упаковки. В табл. 1 представлены сводные данные расчетов плотности регулярных упаковок сфер двух радиусов, выполненные в работе [9].

Хадсон ввел понятие *density increment* - инкремент плотности, которое было использовано в работе [9] для расчетов теоретической плотности ϕ регулярной упаковки бинарного ансамбля сфер с соотношением радиусов r/R :

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_{FFC} \left(1 + (d.i._S + d.i._T) \right) = \\ &= 0.7405 \left(1 + \left(N \left(\frac{r}{R} \right)^3 + 2n \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

где ϕ_{FFC} - плотность регулярной гранецентрированной кубической упаковки сфер одинакового радиуса, $d.i._S$ - инкремент плотности, обусловленный заполнением октаэдрических пустот сферами радиусом r ; $d.i._T$ - инкремент плотности, обусловленный заполнением тетраэдрических пустот сферами радиусом r ; N - количество сфер радиусом r в октаэдрической полости; n - количество сфер радиусом r в тетраэдрической полости.

В работе [10] предложена и описана геометрическая модель для расчета плотности случайной упаковки полидисперсных сферических частиц. В данной модели в заданный объем максимально плотно укладываются сферы радиуса $r_0 = r_{\max}$, затем про-

межутки между ними заполняются сферами радиусом $r_1 < r_0$ с таким расчетом, чтобы в каждый промежуток между сферами r_0 входила не одна, а несколько частиц r_1 , вновь образовавшиеся пустоты таким же образом заполняются сферами радиуса $r_2 < r_1$ и т. д., пока размер сфер не достигнет установленного минимума, или упаковка не достигнет заданной или максимально возможной плотности.

Таблица 1. Плотность регулярной упаковки для разных соотношений радиусов сфер [9]

r/R	N (кол-во малых сфер в октаэдрической полости)	n (кол-во малых сфер в тетраэдрической полости)	Плотность упаковки, ϕ
0,4142	1	0	0,79312
0,2753	2	0	0,771379
0,2583	4	0	0,791565
0,2288	8	0	0,811514
0,2247	8	1	0,824576
0,2166	9	1	0,823318
0,1782	21	1	0,83695
0,1716	21	4	0,849005
0,1547	26	4	0,833714
0,1421	26	5	0,816957
0,1381	27	5	0,812625

Для расчета плотности случайной упаковки ϕ_k , которая получается в результате последовательной укладки сфер радиусов $r_0, r_1, \dots, r_k$, предложена следующая формула:

$$\phi_k = \phi_0 \left(1 + \frac{n_1}{n_0} \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^3 + \dots + \frac{n_k}{n_0} \left(\frac{r_k}{r_0} \right)^3 \right) \quad (2)$$

где ϕ_0 - максимальная плотность случайной упаковки сфер одинакового радиуса (на основании результатов экспериментальных работ [7], принято значение $\phi_0 = 0,64$), r_0 - максимальный радиус сферы из данной упаковки, n_0 - количество сфер максимального радиуса r_0 в рассматриваемой упаковке, r_k - радиус k -той сферы в упаковке, n_k - количество сфер радиуса r_k .

Для подбора фракционного состава с целью получения порошковой засыпки

большой плотности возможно использовать описанные выше подходы:

- геометрическое моделирование плотнейшей регулярной упаковки сфер двух радиусов, согласно Хадсону [9], с целью определения радиусов и количества сфер, которые могут быть размещены в октаэдрических и тетраэдрических полостях;

- расчет плотности регулярной плотной упаковки сфер с выбранным соотношением радиусов с помощью выражения (1), результатом которого будет предельное теоретическое значение плотности порошковой засыпки выбранного фракционного состава;

- расчет плотности случайной упаковки сфер выбранного фракционного состава по формуле (2) для определения плотности порошковой засыпки, которая может быть достигнута в эксперименте.

Для расчета максимальной плотности упаковок и сопоставления результатов с экспериментальными данными были рассмотрены двух-, трех- и четырехфракционные смеси (см. табл. 2). Соотношения размеров частиц подбирались в соответствии с данными табл. 1, т.е. размер частиц самой крупной фракция принимался за R , а размеры частиц меньших фракций: $0,4142R$, $0,2247R$ и $0,1716R$. Для этих смесей были рассчитаны максимальные теоретические плотности регулярной и случайной упаковки, по формулам (1) и (2) соответственно.

Наибольшая расчетная плотность как регулярной, так и случайной упаковки частиц достигается для полифракционного состава № 4, состоящей из трех фракций. Добавление четвертой фракции не только не повышает, но, напротив, незначительно снижает плотность упаковок.

Экспериментальные исследования

Для экспериментальных исследований влияния фракционного состава на плотность упаковки сферических частиц был выбран порошок корунда, как наиболее доступный и распространенный в керамической промышленности.

В качестве узкофракционных порошков для приготовления смесей использовались промышленно производимые порошки, со-

ответствуют зернистости как по ГОСТ 3647-80, так и по стандарту зернистости *FEPA* (см. табл. 3). Выбирались порошки, средний размер которых приблизительно соответствовал указанным в табл.2 соотношениям.

Таблица 2. Фракционные смеси, выбранные для экспериментальных исследований

№ состава	Фракции	Соотношение кол-ва сфер	Соотношение по массе	Плотность регулярной упаковки (1)	Плотность случайной упаковки (2)
1	R	1	1	0,7405	0,64
2	R : $0,2247R$	1:10	1: 0,1134	0,8245	0,7126
3	R : $0,4142R$: R : $0,2247R$: $0,1716R$	1:1:2:30	1: 0,071 : 0,0226 : 0,036	0,83725	0,7235
4	R : $0,2247R$: $0,1716R$	1:10:24	1: 0,113 : 0,0288	0,8464	0,7314

Таблица 3. Фракционные составы

Размер частиц фракции	Зернистость по ГОСТ 3647-80	Зернистость по <i>FEPA</i>
R	10	150
$0,4142R$	M50	F 230
$0,2247R$	M40	F 360
$0,1071R$	M20	F 500

Были получены упаковки порошков четырех фракционных составов (см. табл. 2 и 3) методами свободной засыпки в цилиндрический контейнер диаметром 25 мм и засыпкой с последующим виброуплотнением при частоте $\nu = 50$ Гц и амплитуде вибраций $a = 100$ мкм. Для виброуплотнения было использовано приспособление, которое состоит из закрытой с одной стороны цилиндрической камеры диаметром 25 мм, в которую помещается исследуемый порошок. Сверху слой порошка закрывался фильтровальной бумагой, и перфорированным (для отвода избыточного воздуха) пуансоном, на который монтировался дополнительный груз (массой 180 г и 410 г). На боковой поверхности камеры смонтирована измерительная шкала, для определения высоты слоя порошка в процессе испытаний. Для одной и

той же массы порошка определялась высота слоя порошка, как для свободной засыпки, так и при различных режимах виброуплотнения. Все четыре смеси фракционных составов были приготовлены в двух разных навесках: массой 10 г и 20 г.

Результаты измерения плотности укладки частиц корундовых порошков приведены в табл. 4. При сравнении экспериментальных данных с расчетными прослеживается аналогичная тенденция (см. рис. 1). Наибольшая плотность укладки (максимальная 0,57, средняя 0,54) была достигнута при применении трехфракционного состава № 4.

Таблица 4. Результаты экспериментальных исследований

№	Плотность засыпки				
	Свободная засыпка	Вибро-укладка	Вибро-укладка (груз 180 г)	Вибро-укладка (груз 410 г)	Средняя плотность
1	0,46	0,49	0,53	0,52	0,50
2	0,49	0,52	0,55	0,56	0,53
3	0,49	0,51	0,54	0,55	0,52
4	0,50	0,53	0,56	0,57	0,54

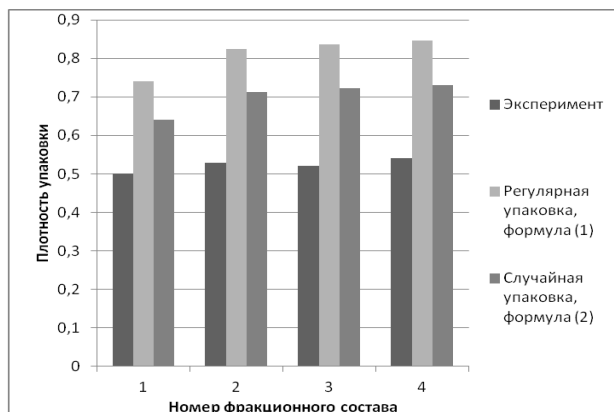


Рис. 1. Расчетная и экспериментальная плотности укладки

Выводы

Для оценки возможностей получения засыпок и прессовок керамических порошков высокой плотности за счет регулирования полифракционного состава порошковой смеси были проведены теоретические и экспериментальные исследования. Обобщенные результаты, представленные на рис. 1, позволяют сделать вывод о том, что известные из литературы методики аналитических рас-

четов плотности укладки полифракционных составов сферических порошковых частиц могут быть использованы на практике для выбора фракционного состава порошков и приближенной количественной оценки плотности укладки порошковой смеси в контейнер. Существенное расхождение расчетных и экспериментальных данных, при сохранении общей тенденции, вероятно свидетельствует о том, что значительное влияние на плотность укладки реальных частиц промышленных порошков оказывают такие факторы, как:

- все частицы в пределах каждой фракции имеют разные размеры;
- отклонения реальной структуры укладки частиц порошка от регулярной плотнейшей упаковки (ГЦК), которая обеспечивает максимально возможную теоретическую плотность;
- отклонения формы реальных частиц порошка от идеальной сферической формы модельных частиц, которые применяются в расчетных методиках;
- характеристики поверхности реальных порошковых частиц, а именно шероховатость и поверхностный заряд.

Исследование закономерностей влияния данных факторов на плотность и структуру укладки частиц керамических порошков является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит разработать новые расчетные методики, а также методы и средства компьютерного моделирования процессов получения керамических материалов и изделий из них.

Применение расчетных методик, математического моделирования и вычислительных (виртуальных) экспериментов является достаточно перспективным направлением прикладных исследований в области технологии керамики и изготовления керамических изделий. Так как сокращение объема дорогостоящих технологических и лабораторных экспериментов и сроков изготовления керамических изделий способно обеспечить значительные экономические выгоды для предприятий керамической промышленности.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания № 11.5987.2017/ВУ на выполнение работы «Организация проведения научных исследований» (Номер для публикации: 11.5987.2017/6.7) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наукоемкие технологии в машиностроении» Московского Политеха.

Список литературы

1. Лукин Е.С. Современная оксидная керамика и области ее применения / Е.С. Лукин и др. // Конструкции из композиционных материалов. – 2007 – №. 1. – С. 3.-13.
2. Кингери У.Д. Введение в керамику. / У.Д. Кингери. – Москва: Стройиздат, 1967. – 500 с.
3. Parisi G. Mean-field theory of hard sphere glasses and jamming / G. Parisi, F. Zamponi. // Rev. Mod. Phys. – 2011 – Vol. 82 – №. 1. – P. 789-845.
4. Tingle G.A. Some geometrical properties of packings of equal spheres in cylindrical vessels. / G.A. Tingle. // Nuclear Engineering and Design. – 1973 – №. 24. – P. 153-179.
5. Слоэн Н. Дж. А. Упаковка шаров / Н. Дж. А. Слоэн // В мире науки. – 1984 – №. 3. – С. 72.-82.
6. Kleiner I. Excursions in the History of Mathematics. / I. Kleiner. – Birkhäuser: Springer, 2012. – 347 p.
7. Aste T. Circle, sphere, and drop packings / T. Aste // Phys. Rev. E. – 1996 – Vol. 53 – P. 2571.- 2579.
8. Бондарева Т.П. Компьютерное моделирование структуры случайной упаковки систем сферических частиц / Т.П. Бондарева. // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2017 – Т. 25 – №. 1-1. – С. 78.-85.
9. Hudson D.R. Density and Packing in an Aggregate of Mixed Spheres / D.R. Hudson // Journal of Applied Physics. – 1949 – №. 20 – P. 154.-162.
10. Королев Л.В. Плотная упаковка полидисперсных частиц в композитных строительных материалах / Л.В. Королев, А.П. Лупанов, Ю.М. Придатко // Современные проблемы науки и образования. – 2007 – Т. 1 – №. 6. – С. 109.-114.

References

1. Lukin E.S. et al. Novel oxide ceramics and fields of its application / E.S. Lukin et// Constructions of composite materials. – 2007. – №1. – P. 3-13.
2. Kingery W. D. Introduction to ceramics / W. D. Kingery – New York, London: John Wiley & Sons, Inc.,2007.– P. 503.
3. Parisi G., Zamponi F. Mean-field theory of hard sphere glasses and jamming / G. Parisi, F. Zamponi // Rev. Mod. Phys. – 2011. – Vol. 82, №1. – P. 789-845.
4. Tingle G.A. Some geometrical properties of packings of equal spheres in cylindrical vessels / G.A. Tingle // Nuclear Engineering and Design. – 1973. – №24 – P. 153-179.
5. Sloane N. J. A. The Packing of Spheres / N. J. A. Sloane // Scientific American. – 1984. – Vol. 1, №250. – P. 116-125.
6. Kleiner I. Excursions in the History of Mathematics / I. Kleiner – Birkhäuser: Springer,2012.– P. 347.
7. Aste T. Circle, sphere, and drop packings / T. Aste // Phys. Rev. E. – 1996. – №53. – P. 2571-2579.
8. Bondareva T.P. Computer modeling of structure random packing of system of spherical particles / T. P. Bondareva // Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Economics. Informatics. – 2013. – Vol. 25, №1-1. – P. 78-85.
9. Hudson D.R. Density and Packing in an Aggregate of Mixed Spheres / D.R. Hudson // Constructions of composite materials. – 2007. – №1. – P. 3-13
10. Korolev L.V. et al. Close-packed arrangement of polydisperse particles in composite building materials / L.V. Korolev, A.P. Lupanov, Yu.M. Pridatko // Modern problems of science and education. – 2007. – Vol. 1, №6. – P. 109-114.

Научное издание

ВЕСТНИК СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сборник научных трудов

Выпуск №2(10) 2018

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.
